



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

**ANA KÁSSIA LOPES GONÇALVES**

**AVALIAÇÃO DA DRENAGEM SUPERFICIAL EM PISTA DE POUSO E  
DECOLAGEM POR MEIO DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS**

**FORTALEZA**

**2020**

ANA KÁSSIA LOPES GONÇALVES

AVALIAÇÃO DA DRENAGEM SUPERFICIAL EM PISTA DE POUSO E  
DECOLAGEM POR MEIO DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

G624a Gonçalves, Ana Kássia Lopes.

Avaliação da drenagem superficial em pista de pouso e decolagem por meio de processamento digital de imagens / Ana Kássia Lopes Gonçalves. – 2020.

84 f.: il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2020.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.

1. Pavimento. 2. Aeródromo. 3. Drenagem superficial. 4. Textura. 5. Processamento Digital de Imagens.  
I. Título.

CDD 388

---

ANA KÁSSIA LOPES GONÇALVES

AVALIAÇÃO DA DRENAGEM SUPERFICIAL EM PISTA DE POUSO E  
DECOLAGEM POR MEIO DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Antônio Júnior Alves Ribeiro  
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

---

Profa. Dra. Manuela de Mesquita Lopes Gennesseaux  
Université Gustave Eiffel  
(antigo Institut Français des Sciences et Technologies des Transports [IFSTTAR])

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, Rejane e Sinfrônio por acreditar nos meus sonhos e contribuir para que eles se realizem. A toda minha família que mesmo longe estava sempre apoiando. Em especial, à minha irmã, Iarla, minha avó Caçula, minha prima Ingrid e meus padrinhos Irene e Rubens. Ao meu namorado, Bruno, pelo amor e incentivo nos momentos difíceis.

Agradeço a todos que me acolheram em uma nova cidade. Aos colegas de mestrado, Renan, Gledson, Pedro, Marília e Aline Vale, obrigada pelo companheirismo e pelos momentos de diversão. À Aline Espíndola pela amizade e pelas contribuições nessa pesquisa me ajudando nos intermináveis ensaios.

Ao professor Heber por contribuir e me guiar, sendo um orientador paciente e atencioso. Também gostaria de deixar um agradecimento à professora Arielle pelas contribuições nesse trabalho e à professora Suelly por ter aceitado fazer parte da banca examinadora deste trabalho.

A todos os professores do Petran que se empenham diariamente para repassar seus conhecimentos.

## RESUMO

A avaliação da aderência em pistas molhadas envolve, dentre vários fatores, características de textura da superfície que é responsável por melhorar a capacidade de escoamento da água na área de contato do pneu com o revestimento. As condições do pavimento podem determinar a ocorrência de hidroplanagem ou perda de tração inaceitável da aeronave, o que pode ocasionar a falta de controle direcional da aeronave, sendo a aderência pneu-pavimento fator preponderante para minimizar a ocorrência dessa situação. As metodologias convencionais de avaliação da drenagem superficial demonstram-se ineficientes e pouco confiáveis, devido à intervenção humana no ensaio. Por outro lado, o desenvolvimento de novas tecnologias permitiu o uso de aplicativos em *smartphones* que conseguem coletar e analisar os dados e imagens capturadas, e, assim, proporcionam avaliações mais ágeis por meio de técnicas como o Processamento Digital de Imagens (PDI). Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo apresentar a análise do escoamento superficial das águas pluviais com avaliação da textura de revestimentos aeroportuários por meio de PDI. O estudo de campo foi realizado no Aeródromo do Catuleve, situado na cidade de Aquiraz, no estado do Ceará, por meio do ensaio normatizado de Mancha de Areia em dois tipos de revestimentos asfálticos, Microrrevestimento Asfáltico a Frio e Concreto Asfáltico Usinado a Quente, a fim de buscar correlações entre as três metodologias de processamento de imagens apresentadas. O primeiro método analisou a quantidade de *pixels* brancos presentes nas imagens por um código desenvolvido no *software* Matlab R2017a; no segundo momento, aplicou-se o método de contagem de *pixels* pelo *software* QGIS 2.18 *with grass* e, por último, aplicou-se a Transformada de Fourier para análise das diferenças da luminâncias entre os *pixels*. Com satisfatórias taxas de sucesso, concluiu-se que o método de contagem de *pixels* mostrou-se o mais eficiente para análise da macrotextura em situações em que há presença de lâmina d'água no revestimento. E quando aplicado consegue resultados de porcentagem drenada de líquido condizentes com a classificação da macrotextura dos revestimentos aeroportuários.

**Palavras-chave:** Pavimento. Aeródromo. Drenagem superficial. Textura. Processamento Digital de Imagens.

## ABSTRACT

The assessment of adherence on wet runway involves, among many factors, surface texture characteristics that are responsible for improving the water's flow capacity in the tire's contact area with the pavement. As pavement conditions may determine the occurrence of hydroplaning or unacceptable loss of aircraft capacity, or which can cause a lack of control of the aircraft's direction, being a grip on the tire-pavement system a major factor in the occurrence of this situation. The methodologies defined for surface drainage evaluation demonstrate inefficient and unreliable, due to human intervention in the test. On the other hand, the development of new technologies enables the use of smartphone applications that collect and analyze captured data and images and thus provide more agile statistics through techniques such as Digital Image Processing (DIP). In this sense, the present work aims to present an analysis of the surface runoff of rainwater with evaluation of the texture of runway of aerodromes the DIP. The field study was conducted at Catuleve Aerodrome, located in the city of Aquiraz, in the state of Ceará, through the standardized Sand Patch test in two types of surface pavements, Hot Mix Asphalt and Micro Cold Mix Asphalt Surfacing, in a order to search for correlations between the three image processing methodologies presented. The first method analyzed the number of white pixels present in the images by a code developed in the Matlab R2017a. In the second moment, the pixel counting method was applied by the software QGIS 2.18 with grass. Finally, the Fourier Transform was applied to analyze the differences in luminance between pixels. With satisfactory success rates, it was concluded that the pixel counting method proved to be the most efficient for analyzing the macrotexture in situations in which there is a water slide on the pavement. And when applied it achieves results of drained percentage of liquid in line with the macrotexture classification of airport pavements.

**Keywords:** Pavement. Airfield. Surface drainage. Texture. Digital Image Processing.

## LISTA DE FIGURAS

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 1  | – Percentual de acidentes por tipo de ocorrência de 2008-2017 .....  | 13 |
| Figura 2  | – Representação da macrotextura e microtextura .....   | 17 |
| Figura 3  | – Influência do comprimento de onda da textura(m) nas características da superfície do pavimento .....             | 18 |
| Figura 4  | – Acidentes e Incidentes ocorridos no Brasil e no mundo .....  | 19 |
| Figura 5  | – Fenômeno de hidroplanagem .....  | 20 |
| Figura 6  | – Ação da película d'água na textura .....   | 21 |
| Figura 7  | – Passos fundamentais para PDI .....   | 24 |
| Figura 8  | – Distribuição das frequências de acordo com a FFT .....   | 26 |
| Figura 9  | – Correlação entre o Hm e PDI por contagem de <i>pixels</i> .....  | 27 |
| Figura 10 | – Resultados demonstrados por escala de cor .....  | 28 |
| Figura 11 | – Equipamento desenvolvido na pesquisa.....  | 29 |
| Figura 12 | – Fluxograma da pesquisa .....   | 30 |
| Figura 13 | – Localização do Aeródromo do Catuleve em Aquiraz/CE.....  | 31 |
| Figura 14 | – Pista de pouso e decolagem do Aeródromo do Catuleve .....  | 31 |
| Figura 15 | – Locação dos pontos estudados .....   | 32 |
| Figura 16 | – Sequência de execução do ensaio de Mancha de Areia .....   | 33 |
| Figura 17 | – Procedimento do levantamento fotográfico .....   | 35 |
| Figura 18 | – Pré-processamento das imagens.....   | 36 |
| Figura 19 | – Pré-processamento e segmentação de um <i>frame</i> .....   | 37 |
| Figura 20 | – Faixas de frequência.....  | 39 |
| Figura 21 | – Fluxograma do algoritmo do PDI por Transformada de Fourier .....   | 39 |
| Figura 22 | – Ferramenta de contagem de <i>pixels</i> no <i>software</i> QGIS .....  | 40 |
| Figura 23 | – Variação da profundidade da mancha de areia do Trecho 01/MRAF.....   | 42 |
| Figura 24 | – Variação da profundidade da mancha de areia do Trecho 02/CAUQ.....   | 43 |
| Figura 25 | – Revestimento em CAUQ com desagregação .....  | 43 |
| Figura 26 | – Diferença visual entre o MRAF e o CAUQ .....   | 44 |
| Figura 27 | – Primeiro teste de Regressão Linear Hm <i>versus</i> % Drenada do MRAF pelo método do <i>software</i> Matlab..... | 47 |
| Figura 28 | – Segundo teste de Regressão Linear Hm <i>versus</i> % Drenada do MRAF pelo método do <i>software</i> Matlab.....  | 48 |
| Figura 29 | – Teste de regressão entre médias de classificação MRAF .....  | 50 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 30 – Teste de Regressão Linear Hm <i>versus</i> % Drenada do CAUQ pelo método de contagem de <i>pixels</i> do <i>software</i> Matlab ..... | 51 |
| Figura 31 – Teste de regressão entre médias de classificação CAUQ .....   | 53 |
| Figura 32 – Teste de Regressão Linear Hm médio <i>versus</i> % Drenada (contagem de <i>pixels</i> ) .....   | 54 |
| Figura 33 – Teste de Regressão Linear Hm aberto <i>versus</i> % Drenada (contagem de <i>pixels</i> ) .....  | 55 |
| Figura 34 – Representação do decaimento da quantidade de líquido no MRAF e CAUQ no ponto 17 e 34 .....  | 58 |
| Figura 35 – Teste de Regressão Linear Hm <i>versus</i> % drenada QGIS (MRAF) .....  | 60 |
| Figura 36 – Teste de Regressão Linear Hm <i>versus</i> % drenada QGIS (CAUQ) .....  | 61 |
| Figura 37 – Teste de Regressão linear Hm <i>versus</i> % drenada FFT .....  | 63 |
| Figura 38 – Teste de Regressão linear Hm <i>versus</i> % drenada FFT pela classificação da macrotextura .....                                     | 65 |
| Figura 39 – Teste de Regressão Linear <i>software</i> Matlab por contagem de <i>pixels versus</i> QGIS .....                                      | 68 |
| Figura 40 – Representação 3D do MRAF .....  | 70 |
| Figura 41 – Representação 3D do CAUQ .....  | 71 |

## LISTA DE TABELAS

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Tabela 1  | – Classificação do ensaio de Mancha de Areia .....  | 33 |
| Tabela 2  | – Profundidade de Macrotextura do Trecho 01/MRAF .....  | 41 |
| Tabela 3  | – Profundidade de Macrotextura do Trecho 02/CAUQ .....  | 42 |
| Tabela 4  | – Limiares para cada ponto .....  | 45 |
| Tabela 5  | – Quantidade de pixels brancos do MRAF .....  | 46 |
| Tabela 6  | – Porcentagem drenada do MRAF .....   | 47 |
| Tabela 7  | – Distribuição da porcentagem drenada de acordo com a classificação de Hm no MRAF.....                        | 48 |
| Tabela 8  | – Classificação da profundidade da macrotextura de campo <i>versus</i> modelo do MRAF.....                    | 49 |
| Tabela 9  | – Médias por classificação no MRAF .....  | 49 |
| Tabela 10 | – Quantidade de <i>pixels</i> brancos do CAUQ.....  | 50 |
| Tabela 11 | – Porcentagem drenada do CAUQ .....   | 51 |
| Tabela 12 | – Classificação de macrotextura de campo <i>versus</i> modelo do CAUQ.....                                    | 52 |
| Tabela 13 | – Médias por classificação no CAUQ.....   | 52 |
| Tabela 14 | – Classificação de macrotextura de campo <i>versus</i> modelo da classificação de macrotextura média .....    | 54 |
| Tabela 15 | – Classificação de macrotextura de campo <i>versus</i> modelo da classificação de macrotextura aberta .....   | 55 |
| Tabela 16 | – Etapas do PDI para revestimento tipo MRAF.....  | 56 |
| Tabela 17 | – Etapas do PDI para revestimento tipo CAUQ.....  | 57 |
| Tabela 18 | – Percentual drenado de água nos pontos 17 e 34.....  | 57 |
| Tabela 19 | – Quantidade de <i>pixels</i> pretos QGIS no MRAF .....   | 59 |
| Tabela 20 | – Quantidade de <i>pixels</i> brancos e % drenada QGIS no MRAF .....  | 59 |
| Tabela 21 | – Quantidade de <i>pixels</i> pretos QGIS no CAUQ .....   | 60 |
| Tabela 22 | – Quantidade de <i>pixels</i> brancos QGIS no CAUQ .....  | 61 |
| Tabela 23 | – Áreas dos gráficos e % drenada FFT .....  | 62 |
| Tabela 24 | – Classificação de macrotextura campo <i>versus</i> modelo FFT por tipo de revestimento .....                 | 64 |
| Tabela 25 | – Classificação macrotextura campo <i>versus</i> modelo FFT por análise da classificação da macrotextura..... | 65 |
| Tabela 26 | – Aplicação da FFT no MRAF.....   | 66 |

|  |    |
|--|----|
| Tabela 27 – Aplicação da FFT no CAUQ.....  | 67 |
| Tabela 28 – Áreas dos gráficos de distribuição de frequência.....  | 67 |
| Tabela 29 – Comparativo % drenada Matlab <i>versus</i> % drenada QGIS .....  | 68 |
| Tabela 30 – Percentual de acerto da classificação da macrotextura campo <i>versus</i> modelo<br>por tipo de revestimento ..... | 69 |
| Tabela 31 – Comparativo entre os métodos na representação de dois pontos .....   | 71 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|        |  |
|--------|--|
| ABNT   | Associação Brasileira de Normas Técnicas                     |
| ANAC   | Agência Nacional de Aviação Civil                            |
| ASTM   | American Society for Testing and Materials                   |
| CAUQ   | Concreto Asfáltico Usinado à Quente                          |
| CENIPA | Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos |
| FFT    | Transformada Rápida de Fourier                               |
| ICAO   | <i>International Civil Aviation Organization</i>             |
| OACI   | <i>Organización de Aviación Civil Internacional</i>          |
| IFI    | <i>International Friction Index</i>                          |
| MRAF   | Microrrevestimento Asfáltico a Frio                          |
| PDI    | Processamento Digital de Imagem                              |
| PPD    | Pistas de Pouso e Decolagem                                  |
| SGP    | Sistema de Gerência de Pavimentos                            |

## SUMÁRIO

|                |   |    |
|----------------|---|----|
| <b>1</b>       | <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | 13 |
| <b>1.1</b>     | <b>Problema e questões de pesquisa</b> .....                                      | 15 |
| <b>1.2</b>     | <b>Objetivos</b> .....  | 15 |
| <b>1.3</b>     | <b>Estrutura do trabalho</b> .....  | 16 |
| <b>2</b>       | <b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....  | 17 |
| <b>2.1</b>     | <b>Aderência pneu-pavimento e a hidroplanagem</b> .....                           | 17 |
| <b>2.2</b>     | <b>Processamento Digital de Imagens (PDI)</b> .....                               | 24 |
| <b>3</b>       | <b>MÉTODO DE PESQUISA</b> .....   | 30 |
| <b>3.1</b>     | <b>Abordagem metodológica</b> .....   | 30 |
| <b>3.2</b>     | <b>Descrição do estudo de caso</b> .....  | 30 |
| <b>3.3</b>     | <b>Ensaio convencional</b> .....  | 32 |
| <b>3.4</b>     | <b>Processamento das imagens</b> .....  | 34 |
| <b>3.4.1</b>   | <i>Levantamento fotográfico</i> .....   | 34 |
| <b>3.4.2</b>   | <i>Extração dos frames dos vídeos</i> .....                                       | 35 |
| <b>3.4.3</b>   | <i>Processamento pelo software Matlab por contagem de pixels</i> .....            | 35 |
| <b>3.4.3.1</b> | <i>Pré-processamento</i> .....  | 35 |
| <b>3.4.3.2</b> | <i>Segmentação</i> .....  | 36 |
| <b>3.4.3.3</b> | <i>Extração das características e reconhecimento</i> .....                        | 37 |
| <b>3.4.3.4</b> | <i>Tratamento dos dados</i> .....   | 37 |
| <b>3.4.4</b>   | <i>Processamento pelo software Matlab por Transformada de Fourier</i> .....       | 38 |
| <b>3.4.5</b>   | <i>Processamento pelo software QGIS 2.18 with grass</i> .....                     | 39 |
| <b>4</b>       | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....  | 41 |
| <b>4.1</b>     | <b>Ensaio convencionais</b> .....   | 41 |
| <b>4.2</b>     | <b>Processamento das imagens</b> .....  | 44 |
| <b>4.2.1</b>   | <i>Determinação do limiar ótimo</i> .....   | 44 |
| <b>4.2.2</b>   | <i>Análise pelo software Matlab por contagem de pixels</i> .....                  | 46 |
| <b>4.2.2.1</b> | <i>Análise por tipo de revestimento</i> .....                                     | 46 |
| <b>4.2.2.2</b> | <i>Análise pela classificação da macrotextura</i> .....                           | 53 |
| <b>4.2.2.3</b> | <i>Análise representativa do PDI para os revestimentos</i> .....                  | 56 |
| <b>4.2.3</b>   | <i>Análise por contagem de pixels no software QGIS 2.18 with grass</i> .....      | 58 |
| <b>4.2.3.1</b> | <i>Microrrevestimento asfáltico a frio – análise por contagem de pixels</i> ..... | 58 |
| <b>4.2.3.2</b> | <i>Concreto asfáltico usinado a quente – análise por contagem de pixels</i> ..... | 60 |

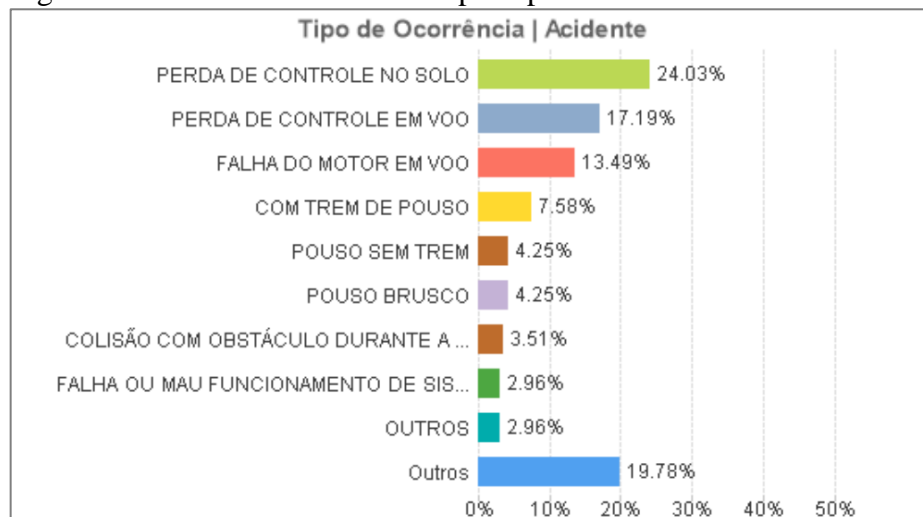
|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.2.4 | <i>Análise pelo software Matlab por Transformada de Fourier</i> .....   | 62 |
| 4.3   | <b>Comparativo entre os levantamentos convencionais e PDI</b> .....   | 67 |
| 5     | <b>CONCLUSÃO</b> .....  | 72 |
| 5.1   | <b>Principais conclusões</b> .....  | 72 |
| 5.2   | <b>Sugestões para trabalhos futuros</b> .....   | 74 |
|       | <b>REFERÊNCIAS</b> .....  | 75 |
|       | <b>APÊNDICE A – ALGORITMO DE EXTRAÇÃO DE <i>FRAMES</i></b> .....  | 79 |
|       | <b>APÊNDICE B – MÉTODO DE OTSU</b> .....  | 80 |
|       | <b>APÊNDICE C – MÉTODO POR CONTAGEM DE <i>PIXELS</i></b> .....  | 81 |
|       | <b>APÊNDICE D – MÉTODO POR TRANSFORMADA DE FOURIER</b> .....  | 82 |
|       | <b>APÊNDICE E – PROPOSTA DE MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DA DRENAGEM SUPERFICIAL EM PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM DE AERÓDROMOS DE PEQUENO PORTE</b> ..... | 84 |

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) (2020a), o mercado aéreo brasileiro apresentou alta pelo seu terceiro ano consecutivo, após a queda de 2016, e atingiu 119,4 milhões de passageiros domésticos e internacionais, maior marca da série. E com o aumento da demanda, cresceu também os acidentes aéreos. No Brasil, o Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA) da Força Aérea Brasileira (FAB) tem por finalidade planejar, gerenciar, controlar e executar as atividades relacionadas com a prevenção e investigação de acidentes aeronáuticos no Brasil. O CENIPA mostra um quantitativo de acidentes ocorrido entre 2008 e 2017, em que se observou 541 acidentes, sendo uma média de 55 acidentes por ano. Dessa forma, tendo em vista a elevada demanda do setor aeroportuário, tem-se necessidade de estudos que avaliem a segurança operacional desses sítios aeroportuários (SANTOS *et al.*, 2018).

A ocorrência mais relatada em CENIPA (SANTOS *et al.*, 2018) é da perda de controle no solo com 24,03% dos acidentes (Figura 1), e uma das causas desse tipo de ocorrência é o acúmulo de água nas pistas de pouso e decolagem (PPD). Esse acúmulo de água na PPD leva à ocorrência de um fenômeno conhecido como hidroplanagem ou aquaplanagem, que é gerada a partir da presença de um fluido contaminante (geralmente água, gelo e borracha provenientes dos pneus das aeronaves) que se interpõe entre o pneu e o revestimento, resultando na perda do contato da aeronave com a PPD. Nesse sentido, a ANAC emite alertas para indicar que o operador de aeródromo providencie ações corretivas, a fim de evitar o acúmulo de água caso a PPD não possua capacidade drenante.

Figura 1 – Percentual de acidentes por tipo de ocorrência de 2008-2017



Fonte: Santos *et al.* (2018 p. 24).

Em pistas molhadas, a distância de parada a ser percorrida se torna de 300 a 600m maior do que em situações de pista seca. Por isso é de suma importância que os pilotos e as pessoas responsáveis pelo controle das operações obtenham informações adequadas sobre as características das superfícies da PPD e sobre a eficácia da frenagem das aeronaves (RODRIGUES FILHO, 2006). Uma característica necessária para se evitar a hidroplanagem é a textura do revestimento, responsável pela permanência do contato pneu-pavimento e pela expulsão das águas pluviais. Uma efetiva interação pneu-pavimento pode ser conseguida por meio de macrotextura e drenagem adequadas. Alguns revestimentos utilizados em revitalização de PPD conferem um apropriado acabamento superficial em relação a macrotextura garantindo adequada drenabilidade e uma operação segura para as aeronaves, dentre eles o Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF) e o *Grooving*.

Para avaliar a textura da camada de revestimento, podem ser utilizados alguns ensaios, tais como: Mancha de Areia, e Drenabilidade. A ANAC (2020b) regulamenta a análise da profundidade média da macrotextura (Hm), a qual não deve ser inferior ao limite mínimo ( $Hm \geq 0,60\text{mm}$ ), caso ocorra, o operador de aeródromo deve informar à ANAC, juntamente com o envio do relatório de medição de macrotextura, quais ações foram ou serão adotadas para restabelecer valores que atendam as normativas. Além disso, deve-se avaliar se a profundidade média de água excede três milímetros na porção central em relação ao eixo da PPD.

Todavia as deficiências e restrições dos métodos convencionais fazem com que os resultados não sejam confiáveis. Entre as desvantagens estão o tempo de levantamento *in situ*, controle das operações aéreas, interrupção da PPD, sobretudo nos aeroportos brasileiros que dispõem de apenas uma única PPD e operadores treinados, resultados de difícil repetibilidade, que acabam por dificultar a obtenção de resultados mais acurados. Por isso, com o passar dos anos, muitos pesquisadores tentaram cobrir as deficiências dos métodos tradicionais e avançaram nas técnicas de avaliação por Processamento Digital de Imagens (PDI).

O desenvolvimento de novas tecnologias possibilitou o uso de *softwares* conectados a dispositivos a *laser* e, mais recentemente, aplicativos em *smartphones* que conseguem coletar e analisar os dados e imagens capturadas. Sendo assim, essas tecnologias são capazes de promover avaliações mais eficientes, com maior produtividade e sem maior influência do operador nos resultados. Porém, mesmo que a avaliação da drenagem da superfície do pavimento seja importante, na última década há poucos sistemas automatizados para a avaliação da drenagem. Mataei *et al.* (2018) foram inovadores em produzir um sistema

automatizado baseado no processamento de imagens a fim de simular a drenagem superficial dos revestimentos.

### **1.1 Problema e questões de pesquisa**

O estado da arte e da prática comprova a influência da aderência pneu-pavimento na segurança das operações de pouso e decolagem. Como também, a interferência das condições climáticas (úmidas ou secas) da superfície do pavimento, das características da textura do revestimento no contato entre o pneu e o revestimento. Embora muitos pesquisadores tenham apresentado métodos e dispositivos para uma melhor avaliação das características da textura do revestimento, pouco se aplica na questão de um revestimento com lâmina d'água. Em geral, no que se refere à macrotextura avalia-se somente as condições de textura de superfície nas condições secas. Mesmo que a capacidade de drenagem do revestimento seja de suma importância para a prevenção de acidentes aeroportuários. Nesse sentido, demonstra-se a importância do monitoramento das características da textura em situação com presença de lâmina d'água no revestimento para a segurança das PPD.

Baseado nos problemas relatados acima, algumas questões de pesquisa podem ser formuladas, tais como:

- a) Como utilizar de processamento digital de imagens (PDI) para avaliação da drenagem superficial em comparação aos métodos convencionais?
- b) É possível avaliar a macrotextura em pavimentos molhados com PDI?
- c) Existe correlação entre os resultados de ensaios convencionais e aqueles obtidos por meio do PDI para avaliação da macrotextura em pavimentos molhados?
- d) Como avaliar a influência da macrotextura no processo de drenagem superficial de revestimentos Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ) e MRAF?
- e) Qual método de PDI proposto melhor se adapta às análises de drenagem?

### **1.2 Objetivos**

O objetivo geral da pesquisa é analisar o escoamento superficial das águas pluviais com avaliação da macrotextura de revestimentos de pistas de pouso e decolagem por meio de Processamento Digital de Imagens (PDI).

Os seguintes objetivos específicos podem ser listados:

- a) Validar o uso de processamento digital de imagens para medição da qualidade da drenagem superficial em comparação aos métodos convencionais;
- b) Analisar a macrotextura do pavimento em condições molhadas por meio de PDI;
- c) Avaliar a influência da macrotextura do pavimento aeroportuário no processo de drenagem;
- d) Avaliar a influência da macrotextura no processo de drenagem superficial de revestimentos dos tipos CAUQ e Microrrevestimento Asfáltico a Frio MRAF;
- e) Avaliar métodos de processamento de imagens que se adequam à condição de escoamento de águas pluviais.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

Este documento está organizado em 5 capítulos, além deste capítulo introdutório, o Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica de livros, artigos, dissertações, teses e documentos de agências reguladoras de aviação, trazendo informações relativas aos principais temas do trabalho, como aderência pneu-pavimento, a hidroplanagem e PDI. O Capítulo 3 descreve informações sobre o método trabalho como descrição dos ensaios realizados e os métodos de processamento das imagens. O Capítulo 4 mostra os resultados e as análises dos métodos utilizados. O Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas com os resultados e sugestões de trabalho futuros.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, são abordados conceitos e pesquisas relacionados à avaliação da aderência pneu-pavimento, hidroplanagem e ao processamento digital de imagens, tais como métodos e evoluções do estudo da arte desses assuntos.

### 2.1 Aderência pneu-pavimento e a hidroplanagem

De acordo com a ANAC (2020b), a aderência da pista de pouso e decolagem é a propriedade física caracterizada pela força de contato entre os pneus da aeronave e a superfície da camada de rolamento do pavimento da pista, que assegura à aeronave resistência à derrapagem e controle direcional. As condições de aderência da pista de pouso e decolagem são fornecidas, principalmente, pelo atrito e pela textura superficial (microtextura e macrotextura).

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) (2012) considera que a microtextura possui comprimentos de ondas menores que 0,5mm e que a macrotextura compreende comprimentos de onda de 0,5mm até 50mm. A microtextura está associada à superfície do agregado e a macrotextura é representada pela altura média, em mm, do relevo da superfície, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Representação da macrotextura e microtextura

Macrotextura - representada pela altura média (mm) do "relevo" da superfície

Microtextura – associada à superfície do agregado: lisa ou áspera



Fonte: Rodrigues Filho (2006, p. 97).

A microtextura está ligada à rugosidade da superfície dos agregados, podendo ser classificada como rugosa ou lisa. Já a macrotextura é função da granulometria dos agregados utilizados na mistura asfáltica aplicada na camada de rolamento do pavimento, podendo ser classificada como fina ou grosseira. Dentre outros fatores, macrotextura e microtextura estão diretamente ligadas ao fenômeno de aderência existente entre o pneu e o pavimento. Enquanto a microtextura é responsável pela ruptura da película de água que se forma entre o

pneu e o pavimento quando este está molhado, a macrotextura está associada ao tempo de drenagem desta mesma lâmina de água (ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL [OACI], 2002). A lâmina d'água formada em um revestimento com macrotextura inadequada é capaz de provocar um fenômeno chamado de hidroplanagem (Figura 3). A hidroplanagem é o fenômeno que ocorre quando os pneus perdem totalmente o contato com a superfície do pavimento devido à presença de uma película de água que se interpõe entre o pneu e o pavimento (RODRIGUES FILHO, 2006).

Figura 3 – Influência do comprimento de onda da textura(m) nas características da superfície do pavimento

| $10^{-6}$               | $10^{-5}$ | $10^{-4}$ | $10^{-3}$                | $10^{-2}$ | $10^{-1}$   | $10^0$         | $10^1$ |
|-------------------------|-----------|-----------|--------------------------|-----------|-------------|----------------|--------|
| Microtextura            |           |           | Macrotextura             |           | Megatextura | Irregularidade |        |
| Atrito em Pista molhada |           |           |                          |           |             |                |        |
|                         |           |           | Ruído Ext.               |           |             |                |        |
|                         |           |           | Ruído Interno            |           |             |                |        |
|                         |           |           | Esguicho e Spray         |           |             |                |        |
|                         |           |           | Resistência ao Rolamento |           |             |                |        |
| Desgaste do Pneu        |           |           | Danos ao Pneu            |           |             |                |        |

Fonte: Noyce (2005 *apud* RODRIGUES FILHO, 2006, p. 99).

Uma operação de pouso e decolagem adequada depende, além de outros fatores, do contato pneu-pavimento e da aderência de ambos. Além disso, a presença ou ausência de água é um fator importante a ser considerado. Uma efetiva interação pneu-pavimento pode ser conseguida por meio de condições adequadas de macrotextura e drenagem. O pavimento da pista de pouso molhado é um aspecto contribuinte para a ocorrência da hidroplanagem, onde ocorre a perda de tração, resultando em frenagem deficiente, com possibilidade de perda do controle da aeronave pelo piloto, ocorrendo uma saída de pista e assim desencadear um acidente aéreo (SILVA, 2008). Na Figura 4 encontram-se alguns acidentes e incidentes de saída de pista ocorridos no Brasil e no mundo.

Figura 4 – Acidentes e Incidentes ocorridos no Brasil e no mundo

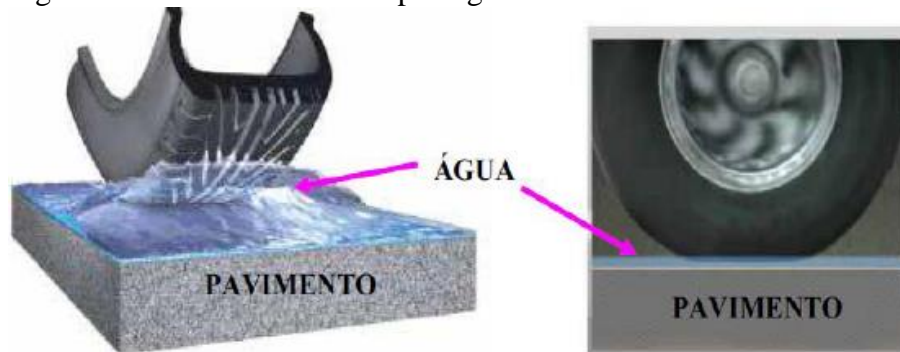
|   |  |
|---|--|
|    | 01/05/1996- Boeing FLY linhas Aéreas- Aeroporto Internacional Mariscal Sucre/Equador. O piloto decide abortar o procedimento de decolagem e acaba caindo em um barranco, após derrapar na pista molhada  |
|    | 27/02/2000 - Boeing 737-400 - Transbrasil Aeroporto Salgado Filho - Porto Alegre (RS)<br>Motivo: hidroplanagem, saída da pista, vindo a parar somente quando encontrou um grande buraco  |
|    | 07/10/2002 - Learjet 60 - American Virginia Aeroporto de Santa Cruz do Sul (RS)<br>A derrapagem do avião causou a morte uma pessoa e ferimento de outras quatro.   |
|    | 04/01/2003 - Cessna 525 - Julio Simões Trasportes Aeroporto de Congonhas (SP).<br>O jato após aterrissar, derrapou indo parar na calçada da Av. dos Bandeirantes. Um dos passageiros e um pedestre que passava na hora do acidente sofreram ferimentos leves                   |
|   | 22/03/2006 – Boeing – BRA Linhas Aéreas Aeroporto de Congonhas (SP).<br>Na aterrissagem o avião fez um ziguezague na pista e chegou até a ponta, entrando em parte do gramado. A ponta da aeronave pode ser avistada da avenida que passa ao lado do aeroporto.                |
|  | 06/10/2006 - Boeing 737-300 – GOL Linhas Aéreas Aeroporto de Congonhas (SP)<br>Ao pousar, a aeronave só parou ao atingir o final da pista, em trecho de grama, onde ficou atravessada, impedindo pousos e decolagens por cerca de uma hora                                     |
|  | 17/01/2007 – Boeing 737 - Varig Aeroporto de Congonhas (SP)<br>Após o pouso, a aeronave foi obrigada a realizar uma freada brusca em virtude da água presente na pista.  |
|  | 07/03/2007 – Bimotor – Abaeté Táxi Aéreo Aeroporto Internacional de Salvador (BA)<br>A aeronave derrapou na pista depois do pouso, por volta das 20 horas. Apenas o piloto e o co-piloto estavam no avião, mas ninguém ficou ferido.   |
|  | 21/04/2007 – Boeing 737 – Gol Linhas Aéreas Aeroporto Internacional de Fortaleza (CE)<br>A aeronave levava 118 pessoas e deslizou durante o procedimento de pouso devido a chuvas intensas, ninguém ficou ferido .   |
|  | 17/07/2007- Airbus– TAM linhas Aéreas Aeroporto de Congonhas (SP)<br>O avião derrapou na hora do pouso o número total de vítimas fatais foi de 199, sendo 187 que estavam na aeronave e 12 em solo. É o primeiro maior acidente em números de vítimas com empresas brasileiras |
|  | 02/04/2016- Embraer TAME linhas aéreas- Aeroporto de Cuenca/Equador. O avião pousou em pista molhada, derrapando sem controle  |
|  | 08/10/2020- Boeing Air India Express. Ao contrário de desacelerar, o avião pareceu ganhar velocidade, indo além da pista escorregadia, molhada por fortes chuvas, e caindo em uma ladeira acentuada, se partindo em dois   |

Fonte: elaborada pela autora, a partir de Silva (2008).

De acordo com a recomendação da OACI (2002), devem ser realizadas ações corretivas quando há acúmulo de água de, aproximadamente, 3mm, que é a profundidade crítica da hidroplanagem. Além disso, as características de superfície como a macrotextura deve ser adequada para ter uma adequada taxa de drenagem de água na interface pneu-pavimento. No Brasil, a ANAC (2020b) considera a PPD contaminada quando a lâmina d'água for maior ou igual a 3mm numa região de 150m de comprimento por 12m de largura na porção central em relação ao eixo da pista.

Em condições molhadas, a camada de água que cobre o pavimento age como um lubrificante e reduz o contato entre os pneus e a superfície do pavimento, acontecendo os fenômenos físicos de hidroplanagem e viscoplanagem. Para Ferreira (2002), esses fenômenos são determinados pelo tipo de contato existente e as condições da superfície do revestimento: seco, úmido ou molhado. É no contato úmido que pode ocorrer a viscoplanagem, já que para a ocorrência desta não é necessário a presença de lâmina d'água para ocasionar a derrapagem dos pneus. A microtextura é de fundamental importância nesses casos, pois a água é aspirada para o topo das asperezas da superfície e interposta entre o pneu e a mesma. A situação de mais atenção é quando o revestimento se encontra molhado, oferecendo risco de hidroplanagem (Figura 5).

Figura 5 – Fenômeno de hidroplanagem



Fonte: Silva (2008).

O risco de hidroplanagem depende de vários parâmetros como: giro dos pneus, pressão de inflação do pneu, profundidade do revestimento, profundidade da água e profundidade média da textura; esta velocidade aumenta quando a profundidade da textura aumenta (AHAMMED, 2009). De acordo com Pulugurtha, Kusam e Patel (2007), a ocorrência da hidroplanagem depende tanto da textura quanto do coeficiente de atrito e o risco de acidentes diminuem com o aumento da profundidade de macrotextura e resistência à derrapagem.

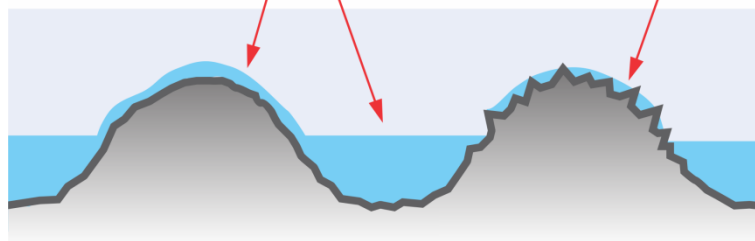
Além da água, outros contaminantes podem provocar a hidroplanagem, dentre eles a neve, areia, óleo e borracha. Hichri *et al.* (2018) avaliaram o efeito de contaminantes da textura da superfície para rodovias através de dois mecanismos: um aprisionamento de partículas pela rugosidade da microtextura superficial e um armazenamento de partículas pelos "reservatórios" criados pela superfície macrotextura. Partículas menores que 40 $\mu\text{m}$  podem ser capturadas pela microtextura de superfície ou formar uma camada; por este fato, eles não são facilmente expulso do contato. Frações com tamanho superior a 40 $\mu\text{m}$  são menos afetadas pelo aprisionamento mecanismo e mais facilmente expulso do contato (ejetado da amostra ou armazenado pela superfície macrotextura). A consequência desse efeito de tamanho é que o atrito se recupera é mais lento quando as partículas são menores que 40 $\mu\text{m}$ .

Para os revestimentos aeroportuários existe uma preocupação com relação à impregnação de borracha, já que esse contaminante possui partículas de tamanho superior a 40 $\mu\text{m}$  e pode preencher as ranhuras e não permitir o adequado escoamento da água, favorecendo os eventos de hidroplanagem (OLIVEIRA, 2009). Associado à isto, Araújo (2017) relata que em pavimentos aeroportuários há uma preocupação maior do que nas rodovias com as propriedades de aderência na interface pneu-pavimento visto que as aeronaves geram cargas solicitantes superiores. Ademais, estas propriedades contribuem para a promoção da segurança na operação das aeronaves. Portanto, a macrotextura está associada à capacidade de drenagem da água no pavimento, o que interfere no contato pneu-pavimento (Figura 6).

Figura 6 – Ação da película d'água na textura

A **macrotextura** desempenha papel de drenagem e armazenamento, mas não consegue perfurar a película de água residual.

A **microtextura**, ao criar altas pressões locais entre o solo e o pneu, ajuda a perfurar a película de água.



Fonte: adaptada de Société de Technologie Michelin (2001, p. 29).

Alguns revestimentos são capazes de ter um melhor escoamento de fluidos devido às suas características, com o Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF), o *grooving* e a Camada Porosa de Asfalto (CPA). O MRAF   aplicado com medida de conserva o preventiva ou corretiva, garantindo melhor desempenho funcional do revestimento, o

*grooving* é caracterizado por ranhuras feitas em pistas aeroportuárias que evitam o acúmulo de água pluvial e o deslizamento das aeronaves durante o pouso e a CPA é um revestimento poroso, de granulometria aberta que torna a drenagem da água mais eficiente.

Apesar dos avanços na tecnologia e nos procedimentos operacionais, as pistas contaminadas com neve, gelo ou água continuaram sendo um desafio (RODRIGUES FILHO, 2006). Muitos estudos demonstraram a relação entre o contato pneu-pavimento no pavimento molhado e características da textura da superfície do pavimento. Pesquisadores utilizam os ensaios convencionais, como o ensaio de mancha de areia, drenabilidade, dentre outros, para evidenciar a importância das características da textura do pavimento na segurança de aeródromos e rodovias e sugerir que a superfície do pavimento seja monitorada continuamente. Ferreira (2002) procurou avaliar a macrotextura do revestimento utilizando como parâmetro a espessura da lâmina d'água. Fez-se uma análise através dos ensaios de mancha de areia, drenabilidade e do afundamento de trilha de roda. A autora concluiu que as avaliações de textura não são parâmetros indicativos de todas as deficiências de aderência pneu-pavimento, mas que se mostra uma ferramenta indispensável para alimentar o banco de dados do Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP).

Rodrigues Filho (2006) analisou a aderência pneu-pavimento em revestimentos asfálticos aeroportuários com *grooving* do Aeroporto Internacional de São Paulo/Congonhas. Para isso, o autor avaliou a macrotextura, o atrito dinâmico, atrito medido com o Pêndulo Britânico e a drenabilidade nas duas pistas de pouso e decolagem. Como o indicado na literatura, o autor concluiu que a contaminação de borracha que cobre parte da pista modifica as características de macrotextura e compromete a capacidade de drenagem da superfície. O autor afirma que a drenabilidade influencia diretamente no atrito. Deste modo, se a drenabilidade é representada pela macrotextura, também pode ser associada ao atrito dinâmico em pista molhada.

Aps (2006), por sua vez, avaliou a textura e o coeficiente de atrito em diferentes revestimentos asfálticos de rodovias e aeroportos através de ensaios de mancha de areia, ensaio de drenabilidade e de pêndulo britânico. A autora calculou os parâmetros de medida de atrito a 60km/h ( $F_{60}$ ) e constante de referência da velocidade ( $S_p$ ), como também estimou as relações existentes entre as medidas de atrito, textura e drenabilidade variando as superfícies ensaiadas. Comprovou-se com base na experiência prática e análises estatísticas que é possível a utilização de equipamentos portáteis para a determinação dos valores de IFI (*International Friction Index*). A autora estabeleceu critérios e faixas de classificação para a aderência em função do par de valores de IFI ( $S_p; F_{60}$ ).

Silva (2008) fez uma análise das condições de textura, drenabilidade e atrito no Aeroporto Internacional de Brasília/DF. O autor também verifica a aplicabilidade de uma metodologia de avaliação de aderência pneu-pavimento em pistas aeroportuárias com revestimentos com *grooving*. Conclui-se que os resultados obtidos nos ensaios de mancha de areia e drenabilidade apresentam adequada correlação entre si, e indicam que o volume de tráfego ocasiona em alto acúmulo de borracha no revestimento com *grooving*, o que influencia nas condições de drenabilidade superficial e no desempenho da PPD quanto às condições de aderência pneu-pavimento. O autor ressalta a importância da manutenção das PPD para as condições de segurança das operações aeroportuárias.

Rodrigues (2013) comparou textura da massa asfáltica compactada em campo e em laboratório de trechos localizados no estado do Ceará. Os ensaios utilizados foram a mancha de areia e pêndulo britânico para avaliar a textura superficial de campo. No laboratório, reproduziu-se as misturas de campo e compactou-se as amostras em tamanhos maiores para permitir reproduzir os mesmos ensaios de campo. Com os resultados a autora desenvolveu um modelo capaz de prever o valor de macrotextura da camada de rolamento por meio de granulometrias das misturas asfálticas estudadas.

Além das técnicas tradicionais, os avanços significativos na tecnologia de laser e na área computacional facilitaram a criação de vários sistemas para medir macrotextura em velocidades de tráfego. A maioria dos estudos é desenvolvida em revestimentos de rodovias. Os pioneiros nas técnicas utilizando *lasers*, o *Mini-Texture-Meter* desenvolvido pelo *British Transport and Road Research Laboratory* e o *Selcom Laser System* desenvolvido por pesquisadores na Universidade do Texas em Arlington são exemplos dos primeiros métodos de avaliação de textura que procurava minimizar a interferência humana nos ensaios. O *Mini-Texture-Meter* e o *Selcom Laser System* usam um feixe de *laser* para examinar a superfície do pavimento e estimar a profundidade da textura do pavimento. A técnica de varredura óptica de alta velocidade sem contato usa um faixa estroboscópica de luz com alto conteúdo infravermelho para gerar gráficos de sombra. Esta técnica pode usar um veículo se movendo em velocidades normais de rodovia para coletar informações da superfície do pavimento, evitando fechar a pista para avaliação (JAYAWICKRAMA; PRASANNA; SENADHEERA, 1996).

Na atualidade, Schmiedel, Gauterin e Unrau (2019) aplicaram uma abordagem indireta via sensores de aceleração que interpretam a formação do spray d'água pelos pneus. Eles discutiram as influências do veículo velocidade, umidade da estrada, pneus, estrutura da

estrada e posicionamento do sensor. Os resultados mostraram que uma quantificação da umidade da estrada é possível, mas depende da soma de todas as condições de contorno.

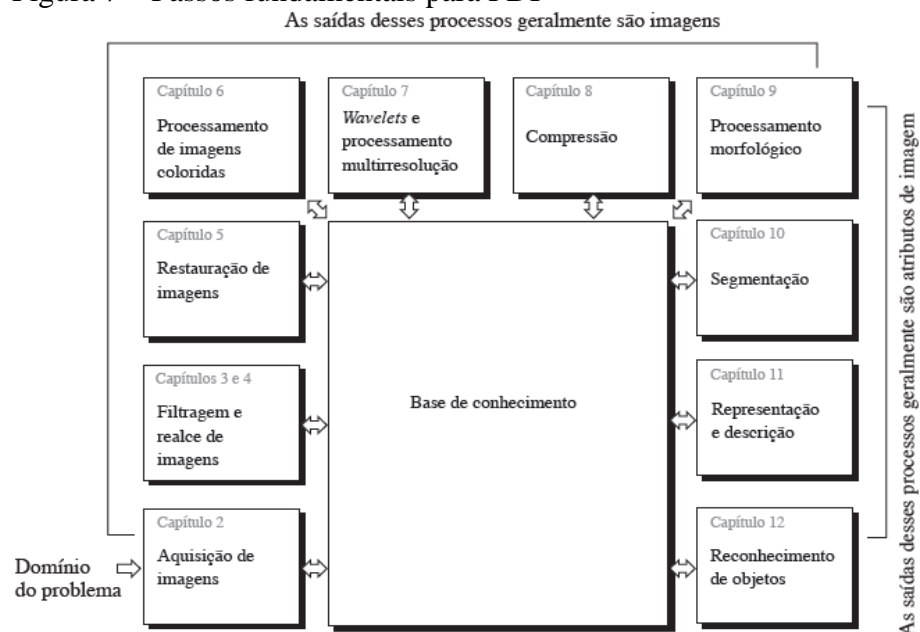
Enquanto isso, desenvolveram-se técnicas que capturam e analisam imagens para obter informações a partir delas. Na pavimentação tal técnica pode ser utilizada para análises sobre textura, defeitos, dentre outros. Nesse sentido, a comunidade de pesquisa passou a utilizar o Processamento Digital de imagens na pavimentação.

## 2.2 Processamento Digital de Imagens (PDI)

O processamento de imagens está ligado ao tratamento e análise de imagens. Ele visa a manipulação e a exibição de imagens prontas, envolvendo diversos processos de tratamento da imagem bem como os processos que permitam a interface entre dispositivos de entrada e saída gráfica e o arquivo de imagem. O PDI tem por objetivo a manipulação da imagem previamente gerada e a extração de informações a partir desta (SANTOS, 2008).

Gonzalez e Woods (2000) consideram que os passos fundamentais para o processamento digital de imagens são: aquisição de imagens, processamento de imagens, segmentação, extração de características e reconhecimento de padrões. O diagrama da Figura 7 não significa que todo processo se aplique a uma imagem. O processo apresentado no diagrama tem a intenção de transmitir uma ideia de todas as metodologias que podem ser aplicadas a imagens para diferentes propósitos e, possivelmente, com diferentes objetivos.

Figura 7 – Passos fundamentais para PDI



Fonte: Gonzalez e Woods (2000).

Uma imagem digital é composta por um número finito de elementos, em que cada elemento tem localização e valor específico e pode ser considerada como sendo uma matriz cujos índices de linhas e de colunas identificam um ponto na imagem, e o correspondente valor do elemento da matriz identifica o nível de cinza naquele ponto. Os elementos dessa matriz são chamados de elementos da imagem, elementos da figura, “*pixels*” ou “*pels*”, estas duas últimas, abreviações de “*picture elements*” (elementos de figura). Um *pixel* é o elemento básico em uma imagem cuja forma mais comum é a retangular ou quadrada, ele também é um elemento com dimensões finitas na representação de uma imagem (SANTOS, 2008).

Com avanços da tecnologia e do poder computacional foram inseridos alguns sistemas capazes de medir parâmetros de textura mais rapidamente. Para Gonzalez e Woods (2000), as três formas principais utilizadas em PDI para a medição de texturas são a estatística, a estrutural e a espectral. As estatísticas são qualificadas como suave, áspera, granular etc.; as estruturais tratam da organização de primitivas de imagens (*textels*) e caracterizam imagens com textura muito regular; e as espectrais são baseadas em propriedades de alguma transformada. A transformada de Fourier é um exemplo de abordagem espectral, em que se detecta a periodicidade global em uma imagem, já que as posições desses padrões periódicos são identificadas por meio de picos de alta-energia no espectro.

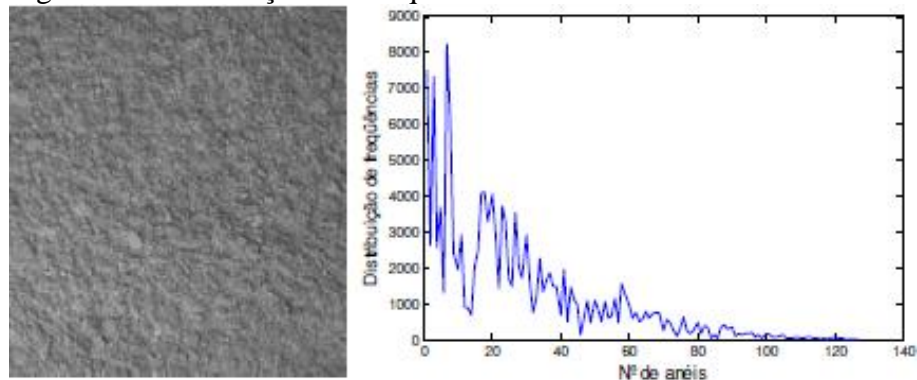
As técnicas mais modernas de PDI utilizam câmeras ou *scanners* para capturar as imagens, além de computadores, onde são instalados *software* que realizam o tratamento dos dados em bases estatísticas. A literatura técnica que trata de PDI cresceu e ganhou mais atenção nos últimos anos (ARAÚJO, 2017).

Pidwerbesky *et al.* (2006) avaliaram a textura superficial de revestimentos de baixo custo tipo tratamento superficial. Os autores utilizaram o ensaio de mancha de areia, e uma técnica de PDI utilizando o *software* Matlab, por meio da *Image Processing Toolbox* que foi aplicada a técnica denominada Transformada Rápida de Fourier (FFT). A técnica analisa os níveis de cinza das regiões de cinza de cada *pixel*, em que imagens com maior quantidade de informações representam aquelas com maior contraste e, conseqüentemente, maior textura, e assim obter informações a partir de cada imagem. Cada imagem foi analisada em até 25 regiões diferentes. Com isso os autores chegaram a correlações adequadas entre as imagens e os resultados do ensaio de mancha de areia, com coeficiente de determinação de 0,80.

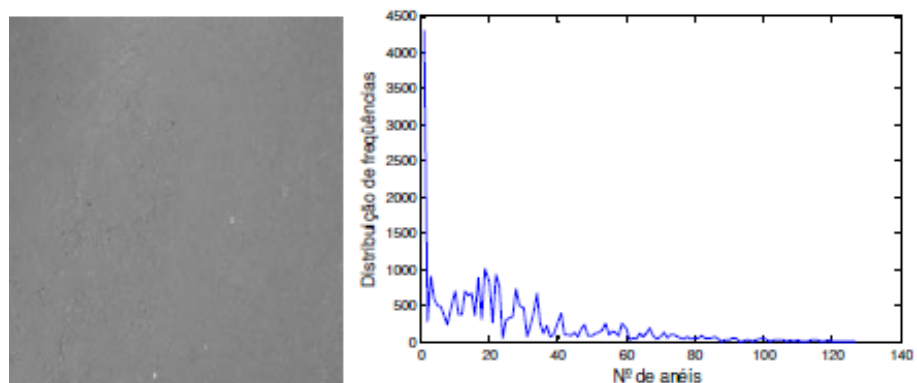
Santos (2008) desenvolveu um algoritmo utilizando o *software* Matlab para analisar a macrotextura de pavimentos. O autor demonstrou que existe relação entre a textura medida pelo ensaio de mancha de areia e a distribuição da frequência obtida por PDI. A

macrotextura foi selecionada para quantificar a condição superficial do pavimento e com as imagens do revestimento foi calculado por um FFT por meio da modificação na intensidade de luz entre *pixels* contíguos, tal modificação é denominada frequência espacial. A relativa diferença na luminância gera um elevado contraste entre dois objetos diferentes em uma imagem. Na imagem do pavimento, o contraste é dado pela quantidade de luz refletida pelo agregado contra a quantidade de luz refletida pelo betume. O autor relacionou a textura à FFT por meio de uma equação polinomial, pois quando usado um polinômio de ordem mais elevada, tende-se a aumentar os valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Com os resultados, concluiu-se que as macrotexturas abertas apresentam faixas de frequência alta e para texturas fechadas revelam-se faixas de frequência baixas (Figura 8). Com o auxílio da Transformada de Fourier (FFT), encontrou-se correlações significativas entre os procedimentos.

Figura 8 – Distribuição das frequências de acordo com a FFT



(a) macrotextura aberta com distribuição de frequência alta



(b) macrotextura fechada com distribuição de frequência baixa

Fonte: Santos (2008).

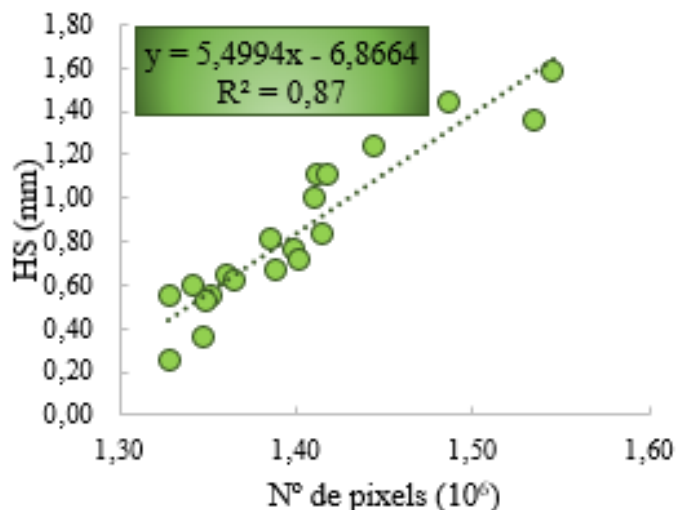
Na aplicação em laboratório, Araujo, Bessa e Castelo Branco (2015) validaram uma abordagem prática para avaliar agregados de mistura quente em relação às suas características de textura de superfície utilizando a técnica de processamento digital de

imagens com o auxílio do AIMS (*Aggregate Image Measurement System*). As características analisadas foram a macrotextura, microtextura. Os resultados de macrotextura obtidos pelo ensaio de mancha de areia não se correlacionaram bem com os resultados obtidos pelo AIMS. Os autores concluíram que a granulometria e os vazios de ar da mistura específica do estudo influenciaram nos resultados inadequados da macrotextura.

Em trechos de campo, Araújo (2017) apresentou uma metodologia para análise de textura de misturas asfálticas aplicadas em pavimentos aeroportuários verificando como a estrutura interna da mistura asfáltica se correlaciona com a macrotextura e com a microtextura destes materiais, com o uso de PDI pelo AIMS. O autor correlacionou os resultados de textura adquiridos por PDI e de ensaios convencionais, obtendo correlações adequadas ( $R^2 = 0,71$ ) entre o ensaio de mancha de areia e o parâmetro obtido pelo AIMS, e concluindo que a granulometria da mistura impacta nos resultados de macrotextura.

Em virtude da dificuldade de obter dados em laboratório sobre a macrotextura, a técnica de PDI é largamente utilizada para imagens retiradas de campo. Sousa (2018) baseou-se em uma metodologia que determina a porcentagem da área de agregados recoberta por ligante asfáltico após a realização do ensaio de adesividade, para avaliar a macrotextura de revestimentos asfálticos. A metodologia utilizou o *software* Matlab R2017a para contagem de *pixels* pretos de uma imagem binarizada, a partir da determinação de um limiar de tom de cinza e obteve correlações de até 0,87 entre a avaliação por PDI e o ensaio de mancha de areia (Figura 9). A partir de equações geradas pelos gráficos de correlação estimou-se valores de profundidade média de macrotextura, a fim de verificar a classificação de acordo com o ensaio de mancha de areia.

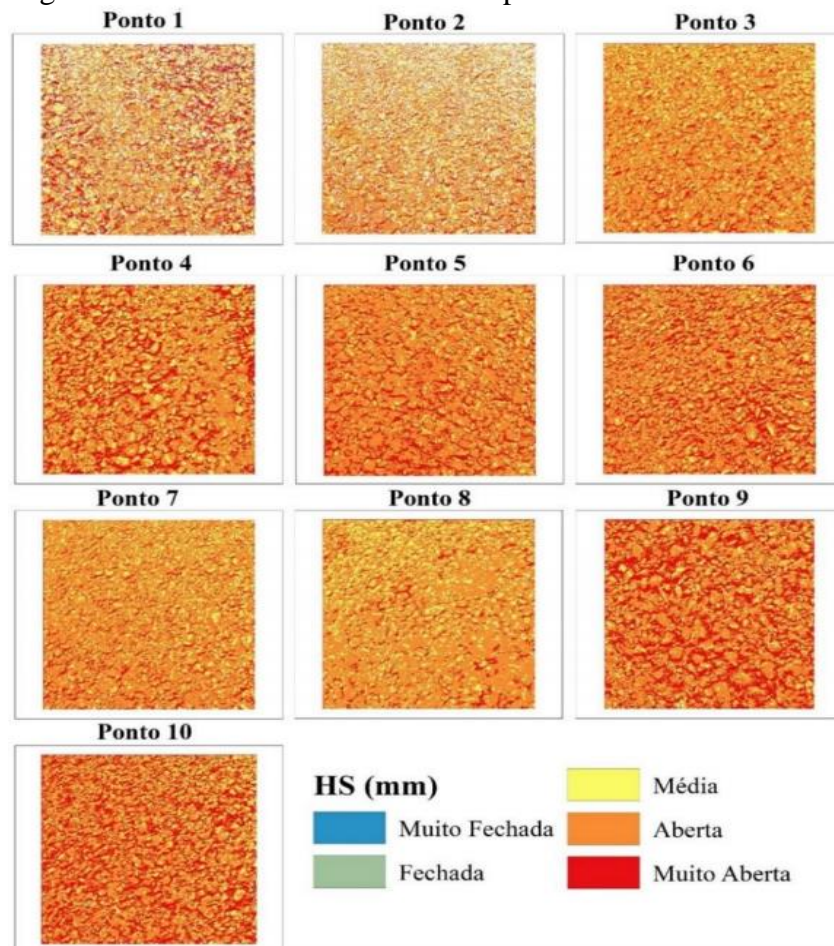
Figura 9 – Correlação entre o Hm e PDI por contagem de *pixels*



Fonte: Sousa (2018).

Oliveira, Arantes e Fontenele (2019) analisaram a macrotextura do revestimento tipo CPA por meio de PDI. As imagens foram processadas em Matlab 2018a que realizou a contagem dos *pixels* brancos em uma imagem. A profundidade da macrotextura é representada pela cor preta na imagem segmentada (0). Sendo assim, deve-se realizar a inversão (1), tornando este elemento de cor branca, retornando ao final do processamento um número a ser associado à macrotextura do revestimento. Os valores médios de cinza foram relacionados com os valores da profundidade da macrotextura. A equação de regressão obtida dessa relação foi aplicada em cada imagem no *software*, e nesse mesmo *software* os resultados foram coloridos segundo intervalos da classificação da macrotextura para rodovias (Figura 10). Com imagens de 1400 x 1400 *pixels* obteve-se um coeficiente de determinação ( $R^2= 0,96$ ) em relação ao ensaio de mancha de areia.

Figura 10 – Resultados demonstrados por escala de cor



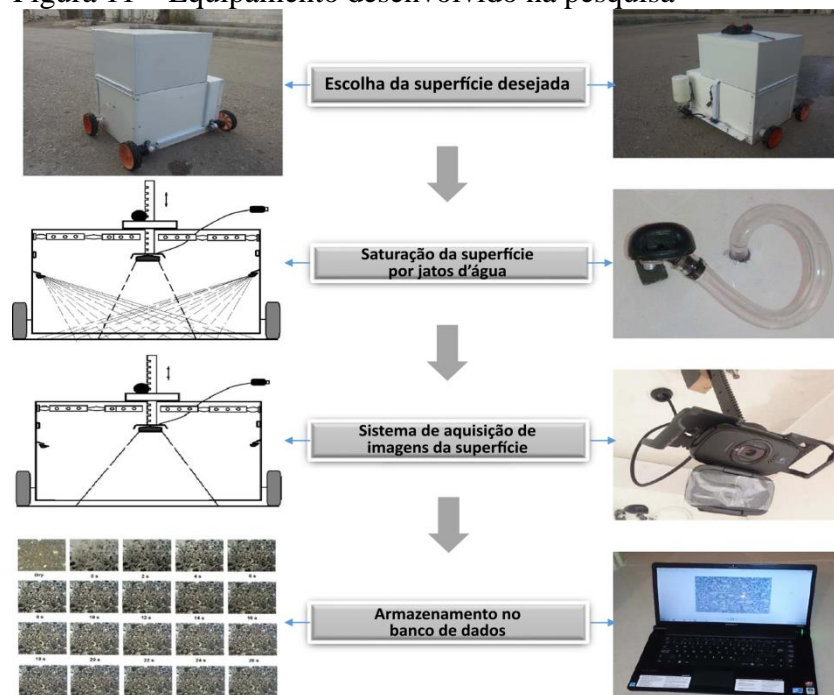
Fonte: Oliveira, Arantes e Fontenele (2019).

Muitos estudos apresentados revelaram a aplicabilidade de técnicas computadorizadas na análise de macrotextura. Porém, a associação do pavimento molhado

com a macrotextura é pouco avaliada por tais técnicas, tanto em rodovias quanto em aeroportos. Puzzo *et al.* (2017) propuseram uma modelagem 3D de revestimento por meio da técnica de PDI utilizando o *software* Autodesk 123 Catch. Um procedimento inovador foi desenvolvido para calcular uma profundidade média digital a partir de um modelo de superfície obtido pela modelagem 3D. Esse modelo de superfície foi correlacionado com a macrotextura obtida pelo ensaio de mancha de areia e obteve com resultado dessa correlação coeficientes de determinação ( $R^2$ ) de 0,94 até 0,99, dependendo da câmera utilizada. Além disso, foi realizado um estudo volumétrico para investigar o comportamento do pavimento em caso de chuva e os autores concluíram que é possível avaliar parâmetros de macrotextura, como também de drenagem quando o ensaio de mancha de areia não é possível.

Mataei *et al.* (2018) foram inovadores em propor um sistema automatizado que foi desenvolvido com base em técnicas de processamento de imagem para avaliar a drenagem da superfície do pavimento de rodovias. Os autores utilizaram técnica denominada *Shearlet Transform*, que se mostrou uma ferramenta eficaz para compactar e processar as imagens de pavimento tiradas pelo *hardware* proposto. Essa técnica conseguiu extrair características do diagrama de granulometria do revestimento analisado e a partir deste analisou a variação do diagrama durante o processo de drenagem. Os autores concluíram, então, que o sistema proposto apresentou uma considerável precisão de 86%. O equipamento desenvolvido encontra-se na Figura 11.

Figura 11 – Equipamento desenvolvido na pesquisa



Fonte: adaptada de Mataei *et al.* (2018, p. 244).

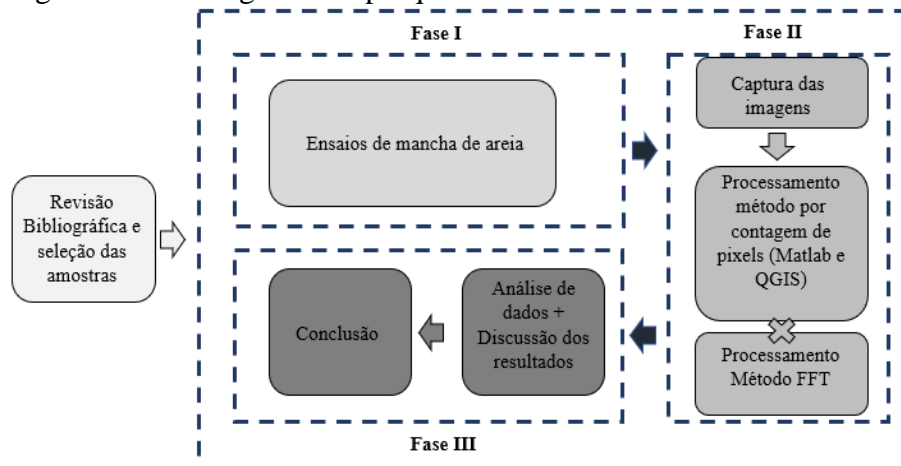
### 3 MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo serão apresentados os materiais, equipamentos e métodos utilizados para atingir os objetivos propostos neste trabalho.

#### 3.1 Abordagem metodológica

O estudo foi dividido em três fases, além da revisão bibliográfica para embasamento do estudo e a seleção da quantidade de amostras. Na Fase I foi realizado o ensaio de mancha de areia (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT], 2016) no Aeródromo do Catuleve localizado em Aquiraz/CE. Logo após, na Fase II, procedeu-se à captura das imagens. Além disso, foram desenvolvidos códigos no *software* Matlab, versão R2017a, para processamento das imagens a partir de dois métodos: contagem de *pixels*, por meio do *software* Matlab e *software* QGIS 2.18 *with grass* e aplicação da Transformada de Fourier. Para concluir, a Fase III foi executada a análise dos dados obtidos com o Processamento Digital de Imagens e o ensaio convencional. O fluxograma das fases da pesquisa está apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma da pesquisa



Fonte: elaborada pela autora.

#### 3.2 Descrição do estudo de caso

A pesquisa foi realizada no Aeródromo do Catuleve (Figura 13) situado na cidade de Aquiraz, estado do Ceará, localizada a 32km da capital. O aeródromo é de natureza privada com código da *International Civil Aviation Organization* (ICAO), definido como SJCM.

Figura 13 – Localização do Aeródromo do Catuleve em Aquiraz/CE



Fonte: Google Earth (2020).

O aeródromo possui uma pista de pouso e decolagem com 720m de comprimento, com designação de cabeceiras 13 e 31 e 18m de largura. O revestimento da PPD era, inicialmente, de Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ), construído em 2010, e no ano de 2018 passou por uma reabilitação, em que se recobriu parte da PPD com Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF). Então, atualmente, a PPD possui cerca de 300m de MRAF, a partir da cabeceira 13, e o restante de CAUQ com 420m de extensão. As condições de macrotextura e drenabilidade foram por ocasião desta pesquisa. A Figura 14 mostra a PPD do Aeródromo do Catuleve na sua aérea e seu perfil de elevação.

Figura 14 – Pista de pouso e decolagem do Aeródromo do Catuleve

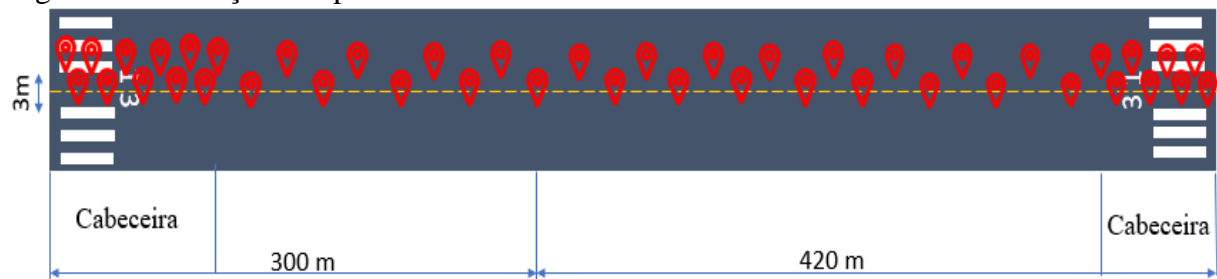


Fonte: Google Earth (2020).

### 3.3 Ensaio convencional

Para melhor análise dos dados, optou-se em segmentar a PPD de acordo com as cabeceiras e seu comprimento de pista. Nas cabeceiras o espaçamento entre os pontos foi de 10m, devido ser as parcelas mais solicitadas da pista. A cabeceira 13 possui 10 pontos e a cabeceira 31, 7 pontos. No comprimento, os pontos foram espaçados de acordo com o estaqueamento da pista, ou seja, a cada 20m. Ao total foram obtidos dados em 42 pontos na extensão da PPD, em que alguns pontos foram excluídos por se localizarem sobre a sinalização. (Figura 1).

Figura 15 – Locação dos pontos estudados

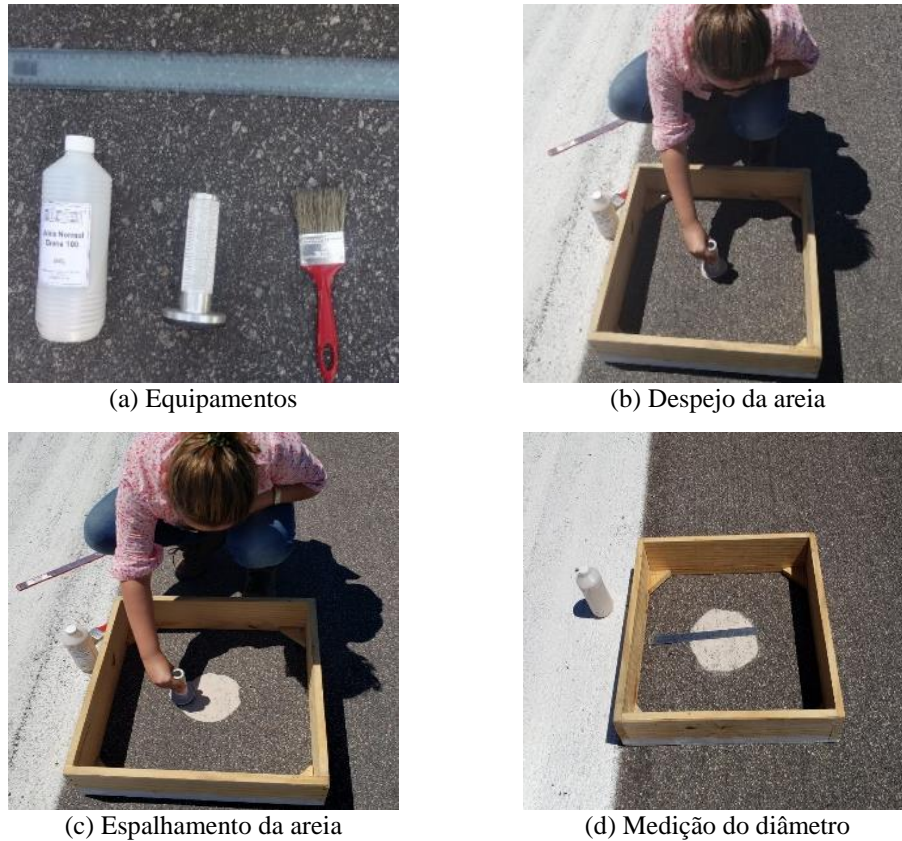


Fonte: elaborada pela autora.

O levantamento realizado em campo para determinação da textura, utilizado nesta pesquisa, foi o ensaio de Mancha de Areia (ABNT, 2016). O ensaio de Mancha de Areia é utilizado para determinar a média da profundidade da altura da areia em superfícies com revestimento. Regulamentado por ABNT (2016), o ensaio tem por objetivo obter características de macrotextura do pavimento.

Para a realização desse procedimento é necessário que uma areia natural limpa e seca, uniforme e de grãos arredondados, tenha a granulometria que passe na peneira de abertura 0,3mm e fique retida na peneira de abertura 0,15mm. Esta areia preencherá os vazios da textura superficial do pavimento com um volume conhecido de  $25.000\text{mm}^3$ . A areia é espalhada suavemente, com o auxílio de um disco de base emborrachada, em movimentos circulares, em uma superfície limpa, até obter uma área aproximadamente circular. A partir desta área circular, mede-se três medidas do diâmetro, para a obtenção do diâmetro médio. A Figura 16 demonstra a sequência de execução do ensaio realizado na PPD do Aeródromo do Catuleve.

Figura 16 – Sequência de execução do ensaio de Mancha de Areia



Fonte: elaborada pela autora.

Posteriormente a essa etapa, calcula-se a altura média ( $H_m$ ) da mancha de areia que é expressa conforme da Equação 1. A macrotextura é classificada de acordo com a profundidade média apresentada na Tabela 1.

$$H_m = \frac{100.000}{\pi \times D_m^2} \quad (1)$$

em que,

$H_m$  – profundidade média da textura (mm); e,

$D_m$  – diâmetro médio do círculo de areia (mm).

Tabela 1 – Classificação do ensaio de Mancha de Areia

| <b>Classificação</b> | <b><math>H_m</math> (mm)</b> |
|----------------------|------------------------------|
| Muito Fechada        | $H_m \leq 0,20$              |
| Fechada              | $0,20 < H_m \leq 0,40$       |
| Média                | $0,40 < H_m \leq 0,80$       |
| Aberta               | $0,80 < H_m \leq 1,20$       |
| Muito Aberta         | $H_m > 1,20$                 |

Fonte: adaptada de ANAC (2012, p. 8).

### 3.4 Processamento das imagens

Na etapa de processamento das imagens foram verificadas metodologias diferentes, a fim de encontrar uma que melhor se adaptasse às análises de drenagem. A primeira delas foi baseada na metodologia adotada por Sousa (2018) que utilizou o *software* Matlab R2017a para contagem de *pixels* pretos de uma imagem binarizada, a partir da determinação de um limiar de tom de cinza para avaliar a macrotextura. Ainda utilizando o *software* Matlab R2017a, foi desenvolvido um código baseado no algoritmo de Pidwerbesky *et al.* (2006) e Santos (2008) que utilizou Transformada de Fourier para verificação de macrotextura de pavimentos. Além disso, foi realizado o processamento das imagens através do *software* QGIS 2.18 *with grass*. Utilizado para análises de georreferenciamento e sensoriamento remoto, o QGIS é um *software* livre com código-fonte aberto que possui ferramentas de análise de PDI.

#### 3.4.1 Levantamento fotográfico

O levantamento fotográfico foi baseado na técnica de Mataei *et al.* (2018), que desenvolveram um sistema em que uma câmera digital registra a textura da superfície do pavimento e o processo de drenagem. O procedimento consiste no uso de uma câmera digital *GoPro Hero7* de 12 *megapixels* que permite a gravação de vídeo até 4K em 60 quadros por segundo. Essa câmera foi escolhida por suas características. Para a captura dos vídeos do escoamento da água, foi necessário saturar o pavimento com 0,5 litros de água colorida com uma tinta branca lavável para melhor visualização do escoamento.

A câmera foi colocada sempre paralela e a 20 cm do pavimento, garantido por meio de uma base, capturando 40s de drenagem. Foram necessários dois operadores para a realização do ensaio, um operador para o despejo do líquido e o segundo operador para segurar a câmera devido aos ventos presentes na região que impossibilitavam que a câmera se mantivesse parada. O procedimento foi realizado no período da manhã, entre 7h e 11h, para diminuir a interferência dos raios solares nas fotografias. Porém, devido ao líquido branco despejado no pavimento pode ter ocorrido de algumas imagens refletirem a luz solar. O brilho, possivelmente, presente nas imagens não interfere nos resultados, pois somente o branco (parte analisada no procedimento) reflete a luz solar. A Figura 17 demonstra o procedimento aplicado.

Figura 17 – Procedimento do levantamento fotográfico



(a) Ilustração do procedimento  
Fonte: elaborada pela autora.

(b) Antes do despejo do líquido

(c) Após o despejo do líquido

### 3.4.2 Extração dos frames dos vídeos

Desenvolveu-se um código no *software* Matlab R2017a capaz de extrair quadros de imagens dos vídeos com o auxílio do *software* ffmpeg 4.2. Com o código, quadros são retirados a cada 1 segundo no tempo zero até o tempo de 40 segundos de drenagem. Optou-se por cortar as fotos em um tamanho de 400x400 *pixels* a partir do centro do quadro, para retirar as interferências como sombras e facilitar o processamento das imagens. As imagens foram convertidas em formato .TIFF e o mesmo conjunto de imagem foi utilizado para os três métodos apresentados. O código é apresentado no Apêndice A.

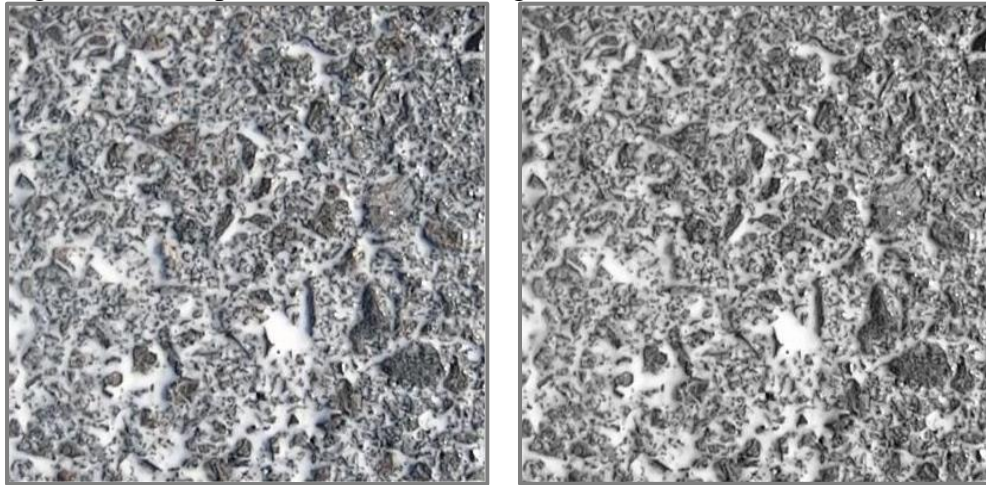
### 3.4.3 Processamento pelo *software* Matlab por contagem de *pixels*

O método descreve o algoritmo utilizado no *software* Matlab R2017a com a função de analisar a drenagem do pavimento a partir da contagem de *pixels* brancos presente nas fotografias.

#### 3.4.3.1 Pré-processamento

No Matlab R2017a criou-se uma função para cálculo da área de *pixels*. Inicialmente a imagem foi lida por meio do comando *imread*. Como as imagens seguem o modelo de cor RGB (Vermelho – *Red*, Verde – *Green*, Azul – *Blue*) em que cada *pixel* da imagem é representado por três valores inteiros de intensidade entre 0 a 255 que correspondem às cores, utilizou-se a função *rgb2gray* para deixá-la no padrão monocromático, ou seja, em tons de cinza, normalizados no padrão de intensidade entre 0 e 1. O procedimento de pré-processamento está demonstrado na Figura 18.

Figura 18 – Pré-processamento das imagens



(a) Imagem original

(b) Imagem monocromática

Fonte: elaborada pela autora.

#### 3.4.3.2 Segmentação

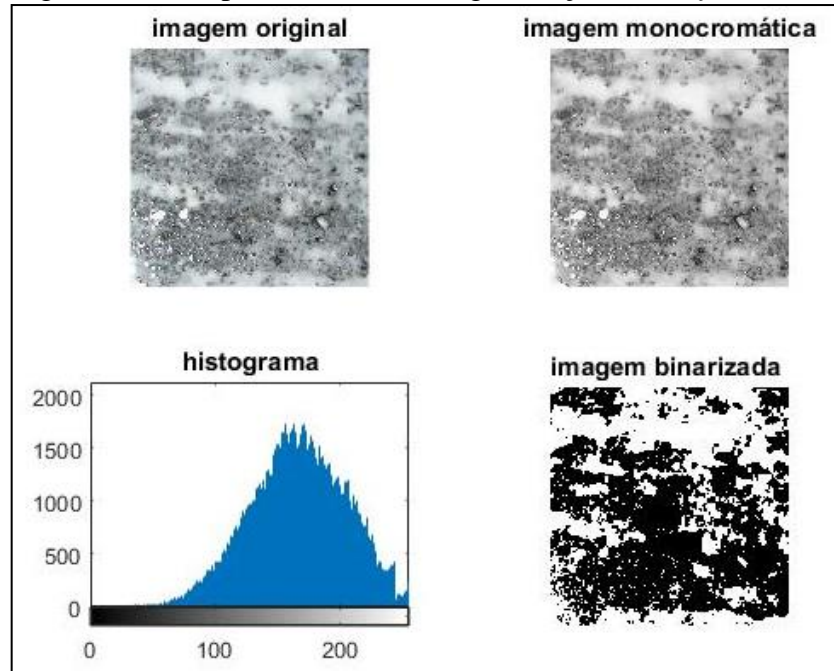
Para esse processo, é utilizado a técnica de segmentação por binarização. Nesse procedimento, estabelece-se um limiar (*threshold*) e converte-se os *pixels* maiores do que o limiar para 1 e o restante dos *pixels* para 0. No processo de limiarização, há dois procedimentos a serem utilizados para a escolha dos tons de corte, um processo manual e o outro, automático, o manual é de difícil reprodução, por esse motivo o processo automático é o mais indicado. Na limiarização existem passos a serem seguidos como o ajuste do histograma para valores mínimos, o Método Otsu e limiarização adaptativa (OTSU, 1979).

Devido à complexidade das imagens e uma gama de características, a limiarização automática é uma questão problemática. Para a escolha de um limiar automatizado adequado, foi aplicado o método de *Otsu* (Apêndice B), utilizando a função *graythresh* para a *frame* inicial de cada ponto. O objetivo desse método é obter um limiar ideal a partir de uma imagem monocromática separando os elementos do fundo e da frente da imagem em dois grupos, atribuindo a cor branca ou preta para cada um deles. O algoritmo busca o limiar que minimiza a soma da variância interna das classes da imagem.

Após a determinação dos limiares de cada ponto, retira-se uma média para obter um limiar único para cada revestimento. E assim, fica atribuído valor 0 para indicar a cor preta, e aos *pixels* com tom de cinza acima do limiar, fica atribuído valor 1, indicando a cor branca. Os dados de limiares passaram por tratamento para retirar *outliers* de imagens com problemas de qualidade. Esse tratamento é o mesmo para todas as etapas em que é

necessário a retirada de pontos. A Figura 19 demonstra os passos de pré-processamento e segmentação utilizando a metodologia de contagens de *pixels* de uma imagem extraída de um ponto.

Figura 19 – Pré-processamento e segmentação de um *frame*



Fonte: elaborada pela autora.

#### 3.4.3.3 Extração das características e reconhecimento

Por meio do comando de *sum* é realizada a contagem dos *pixels* brancos que na imagem representam a área preenchida por água.

Após a contagem de *pixels*, desenvolveu-se um algoritmo que subtrai a quantidade de *pixels* do primeiro *frame* com o último *frame* e, assim, calcula o percentual drenado, que representa a quantidade de água que foi drenada por meio dos sulcos entre os agregados, por meio da porcentagem de *pixels* brancos que diminuiu entre o primeiro *frame* e o último. Este percentual é, então, comparado com os resultados obtidos com o ensaio tradicional. O código do processamento por contagem de *pixels* encontra-se no Apêndice C.

#### 3.4.3.4 Tratamento dos dados

Para a análise dos dados do processamento digital de imagens, continuou-se com a PPD fragmentada em trechos de acordo com o tipo de revestimento. Logo após, aplicou-se a

análise estatística por Distribuição Normal, em que os valores fora dos limites calculados pela Equação 2 foram excluídos da amostra. Além disso, pontos que se situaram sobre a pintura de sinalização também foram excluídos, pois a pintura impossibilitava a visualização do líquido despejado.

$$L = \text{média} \pm \text{desvio padrão} \quad (2)$$

#### 3.4.4 Processamento pelo software Matlab por Transformada de Fourier

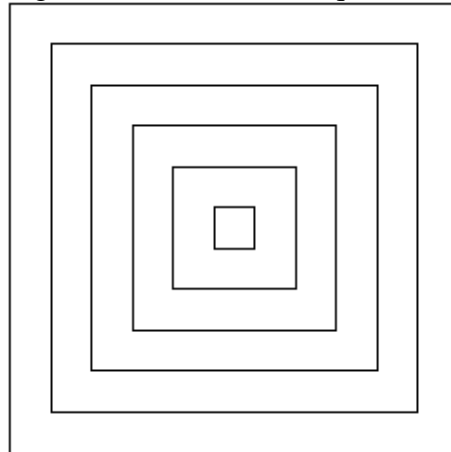
O processamento utilizando a aplicação da Transformada de Fourier ou *Fast Fourier Transform* (FFT) será baseado no procedimento de Pidwerbesky *et al.* (2006) e Santos (2008). O método é baseado no conjunto de informações que pode ser medido em uma imagem a partir da luminância de *pixels*. A partir da comparação do valor medido da luminância refletida em cada *pixel* em que um componente daquela informação foi exposto, é possível verificar que a diferença representa a quantidade de informações.

Quando a diferença de um *pixel* ao outro é zero, isto é, os *pixels* vizinhos são brancos, a informação será a mesma. Para o primeiro *pixel* branco e o seguinte preto, a diferença na luminância refletida é alta, por isso ocorrem mudanças na informação. Por conseguinte, altera o conteúdo de informações transmitidas pelo montante do contraste e, assim, as diferenças são expostas na imagem.

Foi desenvolvido um código no *software* Matlab R2017a para ler as informações contidas nas imagens. Como parte do pré-processamento, as imagens foram lidas por meio do comando *imread* e transformadas em monocromáticas pela função *rgb2gray*.

Para a aplicação da transformada, a imagem é separada em regiões quadradas, chamadas de faixas de frequência nas quais a FFT será aplicada do centro para fora (Figura 20). O código aplica a FFT por meio da função *fft2* segregando os componentes da frequência, então são somadas as transformadas de cada anel e, assim, se produziu os gráficos de distribuição de frequência. A área abaixo do gráfico da distribuição de frequências das imagens foi calculada através da função *trapz*, presente no Matlab R2017a. Essa função realiza integração numérica pelo método trapezoidal que aproxima a integração em um intervalo dividindo a área em trapézios com áreas mais facilmente computáveis.

Figura 20 – Faixas de frequência



Fonte: Santos (2008).

Com o cálculo das áreas de cada imagem foi possível a comparação com as profundidades médias respectivas das manchas de areia. Para comparação foram correlacionadas as profundidades das manchas de areia com a porcentagem que decaiu de área abaixo do gráfico da distribuição de frequências das imagens. A porcentagem foi calculada a partir da Equação 3.

$$\% \text{ drenada } FFT = (A40 * 100) / A01 \quad (3)$$

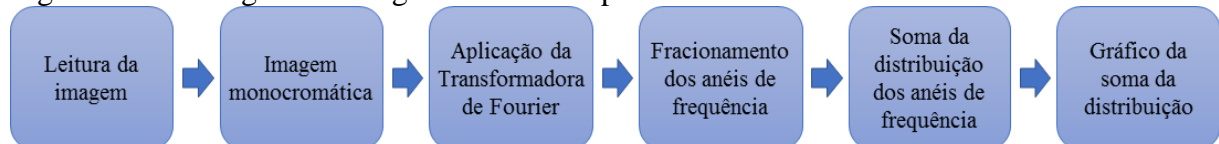
em que,

A40 – área do gráfico de distribuição do *Frame* 40; e,

A01 – área do gráfico de distribuição do *Frame* 01.

Na Figura 21 está demonstrado o fluxograma das fases do processamento das imagens através da Transformada de Fourier. O código encontra-se no Apêndice D.

Figura 21 – Fluxograma do algoritmo do PDI por Transformada de Fourier



Fonte: elaborada pela autora.

### 3.4.5 Processamento pelo software QGIS 2.18 with grass

O software QGIS 2.18 with grass disponibiliza *toolboxes* para processamento de imagens. Seguindo as fases do PDI, a imagem é convertida de RGB em imagem

monocromática por meio da Equação 4, utilizando a ferramenta Calculadora *Raster*. Essa equação é a mesma utilizada de *software* Matlab R2017a em seus códigos de conversão para tons de cinza.

$$IM = 0,299 \times R + 0,587 \times G + 0,114 \times B \quad (4)$$

em que,

IM – Imagem monocromática;

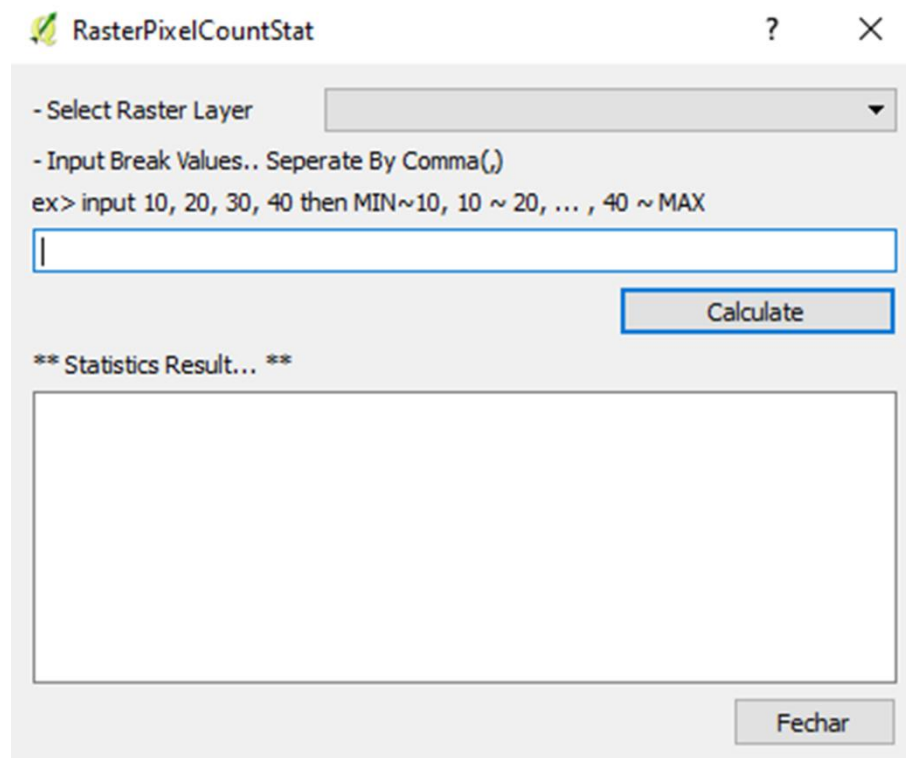
R – Banda vermelha da imagem;

G – Banda verde da imagem;

B – Banda azul da imagem.

Logo após, com a imagem binarizada, calcula-se a média dos níveis de cinza (0-255) de todos os *pixels* abaixo de cada limiar, ou seja, apenas os *pixels* com valores de 1 nas imagens segmentadas, por meio da *toolbox Slicer*. O limiar será definido de acordo com os limiares encontrados por meio do método por contagem de *pixels*, a fim de comparação entre as metodologias. Definido os intervalos do limiar, foi possível contabilizar a quantidade de *pixels* brancos das imagens por meio da ferramenta *Statistics Raster Pixel Count by Classbreak* (Figura 22).

Figura 22 – Ferramenta de contagem de *pixels* no *software* QGIS



Fonte: elaborada pela autora.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados do ensaio convencional de mancha de areia, como também o processamento digital de imagens (PDI) para a análise da profundidade de macrotextura em revestimentos do tipo Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF) e Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ). São discutidas as possíveis relações entre os métodos demonstrados para a pista de pouso e decolagem (PPD) do Aeródromo do Catuleve.

### 4.1 Ensaio convencional

Os valores de macrotextura são apresentados nas Tabelas 2 e 3 de acordo com a divisão dos trechos. Pontos que se situaram sobre a pintura de sinalização foram excluídos, pois a pintura preenche a textura do revestimento, que se torna liso, impedindo a penetração da areia na textura. Este fato acarretaria a obtenção de valores de diâmetros não representativos da realidade da macrotextura para o revestimento. Nas Tabelas 2 e 3, está assinalado com asterisco o ponto final da cabeceira, em que os ensaios foram realizados a cada 10m.

O Trecho 01, com 310m de extensão, corresponde ao revestimento de MRAF, cujos resultados do ensaio de mancha de areia possui profundidade de areia (Hm) médio de 1,02mm, ou seja, classificado como textura aberta. A Tabela 2 apresenta os resultados do ensaio no MRAF.

Tabela 2 – Profundidade de Macrotextura do Trecho 01/MRAF

| Pontos | Faixa | Hm (mm) | Pontos | Faixa | Hm (mm) |
|--------|-------|---------|--------|-------|---------|
| 1      | E     | 0,75    | 11     | D     | 0,98    |
| 2      | D     | 0,77    | 12     | E     | 0,82    |
| 3      | E     | 0,85    | 13     | D     | 1,15    |
| 4      | D     | 1,19    | 14     | E     | 0,72    |
| 5      | D     | 0,68    | 15     | D     | 1,19    |
| 6      | E     | 0,82    | 16     | E     | 0,95    |
| 7      | D     | 1,42    | 17     | D     | 1,55    |
| 8      | E     | 1,06    | 18     | E     | 1,30    |
| 9      | D     | 0,95    | 19     | D     | 1,35    |
| 10*    | E     | 0,95    | -      | -     | -       |

Hm médio – 1,02 mm  
Classificação da profundidade da macrotextura – Aberta  
Desvio Padrão – 0,25

\* Final da medição a cada 10 m

Fonte: elaborada pela autora.

O Trecho 02 inicia-se com revestimento em CAUQ e possui 390 m de extensão. A profundidade de macrotextura possui um Hm de 0,70mm, classificada como textura média. A Tabela 3 apresenta os resultados individuais dos ensaios de mancha de areia do CAUQ.

Tabela 3 – Profundidade de Macrotextura do Trecho 02/CAUQ

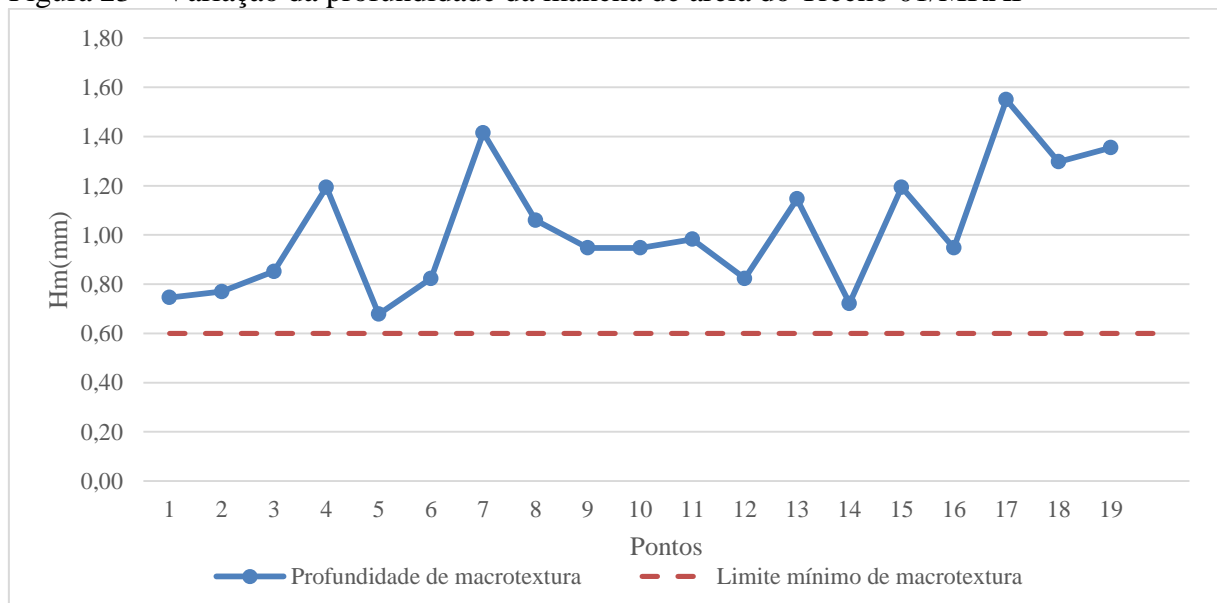
| Pontos | Faixa | Hm (mm) | Pontos | Faixa | Hm (mm) |
|--------|-------|---------|--------|-------|---------|
| 20     | D     | 0,98    | 31     | D     | 0,55    |
| 21     | E     | 0,82    | 32     | E     | 0,55    |
| 22     | D     | 1,15    | 33     | D     | 0,58    |
| 23     | E     | 0,72    | 34     | E     | 0,75    |
| 24     | D     | 1,19    | 35     | D     | 0,85    |
| 25     | E     | 0,95    | 36*    | E     | 0,72    |
| 25     | D     | 1,55    | 37     | D     | 0,68    |
| 27     | E     | 1,30    | 38     | D     | 0,72    |
| 28     | D     | 1,35    | 39     | E     | 0,70    |
| 29     | D     | 0,42    | 40     | D     | 1,06    |
| 30     | E     | 0,58    | 41     | E     | 0,58    |

Hm médio – 0,70  
Classificação da profundidade da macrotextura – Média  
Desvio padrão – 0,17

\* Início da medição a cada 10 m  
Fonte: elaborada pela autora.

Na Figura 23, é possível visualizar as variações de profundidade de macrotextura para o Trecho 01. É possível observar que todos os pontos se encontram acima do limite mínimo de profundidade de macrotextura exigido pela ANAC (2020b) de 0,60mm. Além disso, também é possível notar maiores valores de macrotextura nos pontos finais devido à degradação da PPD.

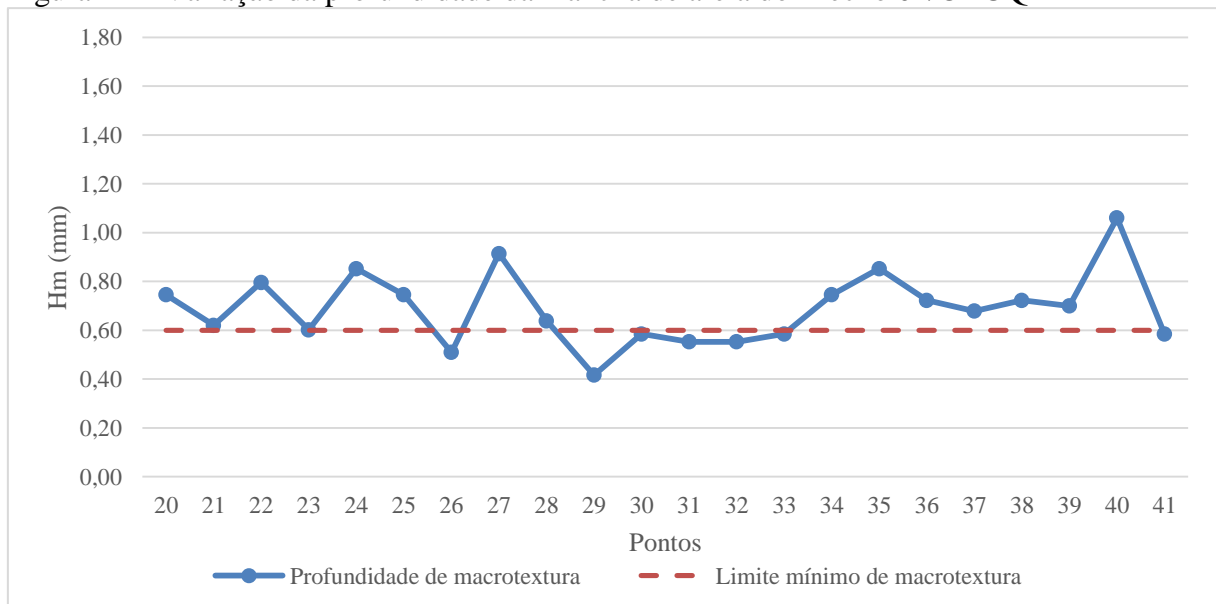
Figura 23 – Variação da profundidade da mancha de areia do Trecho 01/MRAF



Fonte: elaborada pela autora.

Para o CAUQ, a Figura 24 plota em gráfico o trecho 02. Ao contrário do trecho 01 em MRAF, esse trecho apresenta pontos em que a macrotextura é abaixo do recomendado de 0,60 mm pela ANAC (2020b). Possivelmente a macrotextura do trecho 02 é menor devido a própria característica da mistura em ser mais densa e fechada do que MRAF, além do polimento e desgaste do revestimento decorrente aos 8 anos de operação da PPD. O ponto 40, no final da PPD, e alguns outros pontos se destacam pelo valor de macrotextura elevado, não comum nesse tipo de revestimento. Esses valores decorreram devido ao alto desgaste desse revestimento, em que alguns pontos apresentaram desagregação (Figura 25).

Figura 24 – Variação da profundidade da mancha de areia do Trecho 02/CAUQ



Fonte: elaborada pela autora.

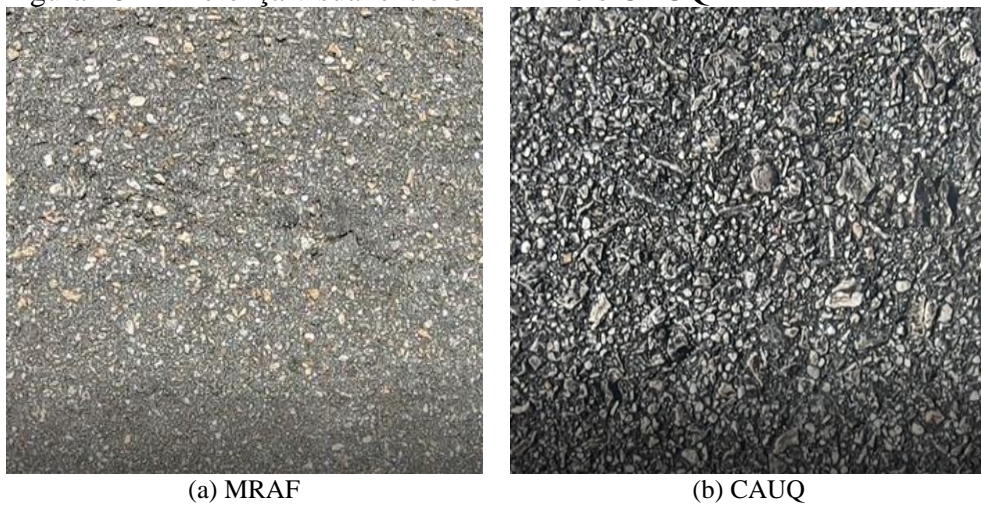
Figura 25 – Revestimento em CAUQ com desagregação



Fonte: elaborada pela autora.

A diferença entre as classificações de profundidade de macrotextura vistas entre os dois revestimentos, não se limita somente a diferença do tempo de uso da PPD. O MRAF possui como característica própria uma macrotextura mais aberta do que o CAUQ, sua granulometria contínua contribui para a formação de sulcos no revestimento. Por sua vez, o CAUQ é uma mistura de agregados de vários tamanhos, o que facilita o arranjo entre agregados, promovendo uma superfície mais uniforme. Na Figura 26 é possível visualizar a diferença de granulometria dos revestimentos.

Figura 26 – Diferença visual entre o MRAF e o CAUQ



Fonte: elaborada pela autora.

## 4.2 Processamento das imagens

Processaram-se as imagens separadamente para cada revestimento, MRAF e CAUQ, e para cada momento do vídeo a ser analisado. Alguns pontos foram expurgados devido à presença da tinta de sinalização na PPD e a qualidade das imagens, o que impossibilitou a análise. Cerca de 8 pontos foram excluídos, em sua maioria no revestimento de CAUQ, devido ao forte vento no dia do levantamento. Os pontos retirados da análise estão demarcados com asteriscos.

### 4.2.1 Determinação do limiar ótimo

Por meio do método de Otsu, determinaram-se quatro limiares a partir da média do limiar de cada ponto processado. Para evidenciar a segmentação entre os *pixels* brancos e pretos da imagem, obtiveram-se limiares diferentes para as imagens no momento zero (*Frame*

01) e com 40 segundos do vídeo (*Frame 40*), para cada revestimento. A Tabela 4 apresenta os limiares de cada imagem, além do limiar ótimo para cada *frame* e revestimento.

Tabela 4 – Limiares para cada ponto

| MRAF          |                |               |                | CAUQ          |                |               |                |
|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Frame 01      |                | Frame 40      |                | Frame 01      |                | Frame 40      |                |
| Ponto         | Limiar de Otsu | Ponto         | Limiar de Otsu | Ponto         | Limiar de Otsu | Ponto         | Limiar de Otsu |
| 1             | 0,64           | 1             | 0,61           | 20            | 0,72           | 20            | 0,64           |
| 2             | 0,67           | 2             | 0,59           | 21            | 0,79*          | 21            | 0,60           |
| 3             | 0,70           | 3             | 0,58           | 22            | 0,83*          | 22            | 0,63           |
| 4             | 0,66           | 4             | 0,63           | 23            | 0,76           | 23            | 0,57           |
| 5             | 0,81*          | 5             | 0,59           | 24            | 0,75           | 24            | 0,59           |
| 6             | 0,66           | 6             | 0,55           | 25            | 0,51*          | 25            | 0,53*          |
| 7             | 0,80           | 7             | 0,65*          | 27            | 0,64           | 27            | 0,64           |
| 8             | 0,70           | 8             | 0,59           | 28            | 0,67           | 28            | 0,63           |
| 9             | 0,74           | 9             | 0,60           | 31            | 0,76           | 31            | 0,62           |
| 10            | 0,70           | 10            | 0,61           | 32            | 0,72           | 32            | 0,55*          |
| 11            | 0,70           | 11            | 0,57           | 33            | 0,70           | 33            | 0,64           |
| 12            | 0,66           | 12            | 0,54*          | 34            | 0,66           | 34            | 0,58           |
| 13            | 0,69           | 13            | 0,60           | 35            | 0,7            | 35            | 0,59           |
| 14            | 0,72           | 14            | 0,54*          | 37            | 0,74           | 37            | 0,62           |
| 15            | 0,72           | 15            | 0,58           | 38            | 0,65           | 38            | 0,54*          |
| 16            | 0,72           | 16            | 0,66*          | 39            | 0,68           | 39            | 0,65           |
| 17            | 0,57           | 17            | 0,56           | 40            | 0,78           | 40            | 0,68*          |
| 18            | 0,57           | 18            | 0,66*          | 41            | 0,74           | 41            | 0,65           |
| 19            | 0,45*          | 19            | 0,48*          |               |                |               |                |
| Média         | 0,68           | Média         | 0,59           | Média         | 0,71           | Média         | 0,61           |
| Desvio padrão | 0,08           | Desvio padrão | 0,04           | Desvio padrão | 0,07           | Desvio padrão | 0,04           |
| Limiar mínimo | 0,60           | Limiar mínimo | 0,55           | Limiar máximo | 0,78           | Limiar máximo | 0,65           |
| Limiar máximo | 0,76           | Limiar máximo | 0,63           | Limiar mínimo | 0,64           | Limiar mínimo | 0,57           |
| Limiar ótimo  | 0,68           | Limiar ótimo  | 0,59           | Limiar ótimo  | 0,71           | Limiar ótimo  | 0,62           |

\* Pontos excluídos da análise.

Fonte: elaborada pela autora.

Os resultados da Tabela 4 mostram que mesmo após a exclusão de dados considerados inadequados manteve-se a média do limiar. Portanto, a *Frame 01* e a *Frame 40* apresentam limiar ótimo de 0,68 e 0,59, respectivamente. Assim como o MRAF, o CAUQ também não sofreu alterações expressivas com a eliminação dos pontos acima e abaixo do desvio-padrão. Sendo assim, seus limiares ótimos nas *frames 01* e *40* foram de 0,71 e 0,62, respectivamente.

Com o limiar ótimo, calculou-se o desvio-padrão dos dados que não foram expurgados e, a partir disso, estabeleceu-se uma faixa de limiares para investigar os limiares coincidentes entre os *frames* com melhores relações entre os ensaios convencionais.

#### 4.2.2 Análise pelo software Matlab por contagem de pixels

Estabelecida a faixa de limiares, processaram-se as imagens para cada limiar com os *frames* correspondentes ao primeiro segundo (*Frame 01*) após a saturação do revestimento e ao tempo de 40s de escoamento (*Frame 40*). É importante salientar que os dois revestimentos serão analisados separadamente, já que possuem características de textura diferentes.

##### 4.2.2.1 Análise por tipo de revestimento

Iniciou-se o procedimento com o MRAF. O processamento das imagens com sua quantidade de *pixels* brancos no MRAF para o *Frame 01* foi realizado de acordo com o limiar ótimo para cada momento do escoamento analisado. Para a análise, instituiu-se o limiar mais próximo coincidente entre os *frames* 01 e 40, sendo este de 0,61. A quantidade de *pixels* dos *frames* 01 e 40 para o limiar de 0,61 está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Quantidade de pixels brancos do MRAF

| Pontos                            | Quantidade de <i>pixels</i><br><i>Frame 01</i> | Quantidade de <i>pixels</i><br><i>Frame 40</i> | Pontos                            | Quantidade de <i>pixels</i><br><i>Frame 01</i> | Quantidade de <i>pixels</i><br><i>Frame 40</i> |
|-----------------------------------|--|--|-----------------------------------|--|--|
| 1                                 | 98843  | 71390  | 11                                | 145321   | 65041  |
| 2                                 | 125720   | 59990  | 12                                | 131301   | 56700  |
| 3                                 | 142710   | 76308  | 13                                | 129589   | 82148  |
| 4                                 | 117930   | 87304  | 14                                | 152938   | 61830  |
| 5                                 | 159418   | 89548  | 15                                | 136066   | 66509  |
| 6                                 | 108866   | 57107  | 16                                | 139172   | 105046   |
| 7                                 | 157010   | 99008  | 17                                | 65406  | 53995  |
| 8                                 | 132890   | 73828  | 18                                | 133797   | 125178   |
| 9                                 | 150867   | 72594  | 19                                | 23608  | 32629  |
| 10                                | 136407   | 76814  |                                   |  |  |
| Média ( <i>Frame 01</i> )         |  | 125676,79                                      | Média ( <i>Frame 40</i> )         |  | 74366,68                                       |
| Desvio padrão ( <i>Frame 01</i> ) |  | 32328,38                                       | Desvio padrão ( <i>Frame 40</i> ) |  | 20378,35                                       |
| Limiar mínimo ( <i>Frame 01</i> ) |  | 93348,41                                       | Limiar mínimo ( <i>Frame 40</i> ) |  | 53988,33                                       |
| Limiar máximo ( <i>Frame 01</i> ) |  | 158005,17                                      | Limiar máximo ( <i>Frame 40</i> ) |  | 94745,04                                       |

Fonte: elaborada pela autora.

Após o cálculo da quantidade de *pixels* brancos para o limiar de 0,61, determinou-se a porcentagem drenada da água para os *frames* 01 e 40, apresentada na Tabela 6. O revestimento de MRAF obteve uma média de porcentagem drenada de líquido de 59,51%, com desvio padrão de 14,75.

Tabela 6 – Porcentagem drenada do MRAF

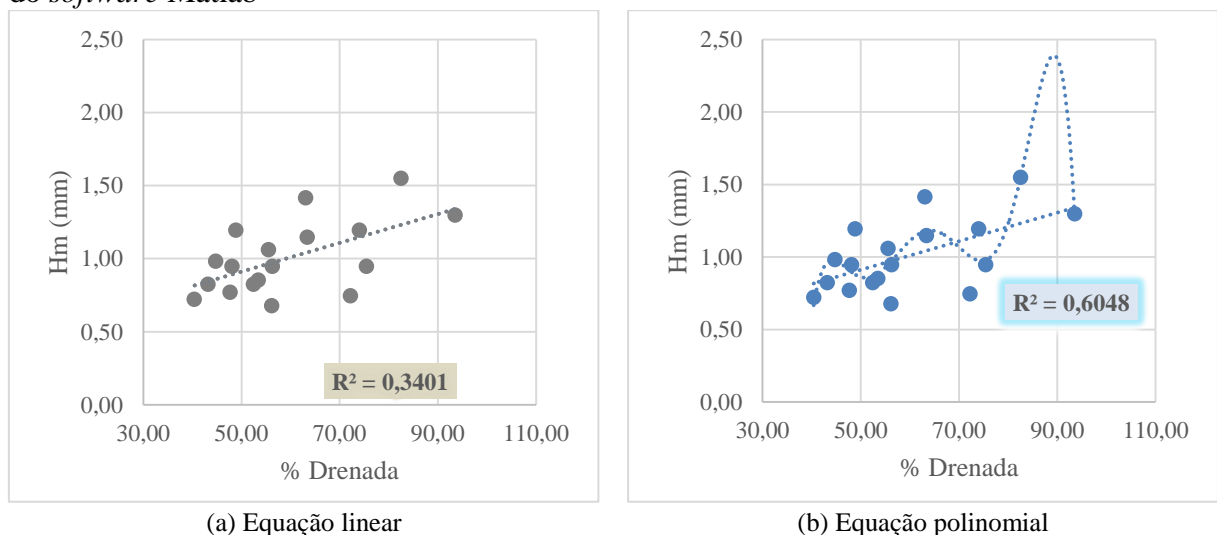
| MRAF   |           |        |           |        |           |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| Pontos | % Drenada | Pontos | % Drenada | Pontos | % Drenada |
| 1      | 72,23     | 7      | 63,06     | 13     | 63,39     |
| 2      | 47,72     | 8      | 55,56     | 14     | 40,43     |
| 3      | 53,47     | 9      | 48,12     | 15     | 48,88     |
| 4      | 74,03     | 10     | 56,31     | 16     | 75,48     |
| 5      | 56,17     | 11     | 44,76     | 17     | 82,55     |
| 6      | 52,46     | 12     | 43,18     | 18     | 93,56     |

Média – 59,51%  
Desvio padrão – 14,75

Fonte: elaborada pela autora.

A partir dos dados de profundidade de macrotextura (Hm) e porcentagem drenada, verificou-se a correlação entre as variáveis para os dezoito pontos analisados. Com um R múltiplo de 0,58, os dados inicialmente, obtiveram fracas correlações. Para assegurar a fraca correlação, realizou-se um teste de regressão estatística, no qual se observa que a profundidade de areia se correlaciona melhor com a porcentagem drenada por meio de equações polinomiais. A Figura 27 evidencia o comportamento de que os resultados de profundidade de macrotextura se correlacionam melhor com a porcentagem drenada, quando analisado com equações polinomiais.

Figura 27 – Primeiro teste de Regressão Linear Hm *versus* % Drenada do MRAF pelo método do *software* Matlab



Fonte: elaborada pela autora.

Devido à fraca correlação optou-se por um tratamento dos dados, por meio da exclusão de *outliers* fora dos limites do desvio padrão. Após esse procedimento, restaram 13 pontos considerados coerentes para a análise. Os dados da Tabela 7 encontram-se agrupados em ordem crescente de acordo com sua classificação de profundidade de macrotextura.

Tabela 7 – Distribuição da porcentagem drenada de acordo com a classificação de Hm no MRAF

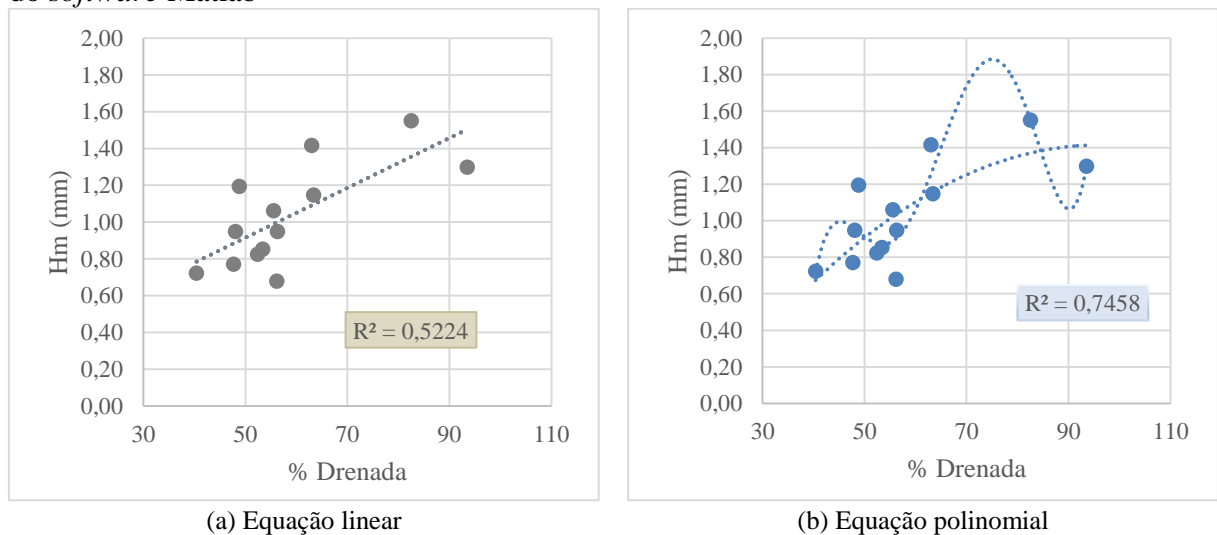
| Média  |           | Aberta |           | Muito Aberta |           |
|--------|-----------|--------|-----------|--------------|-----------|
| Pontos | % Drenada | Pontos | % Drenada | Pontos       | % Drenada |
| 5      | 56,17     | 6      | 52,46     | 18           | 93,56     |
| 14     | 40,43     | 12     | 43,18*    | 7            | 63,06     |
| 1      | 72,23*    | 3      | 53,47     | 17           | 82,55     |
| 2      | 47,72     | 9      | 48,12     |              |           |
|        |           | 10     | 56,31     |              |           |
|        |           | 16     | 75,48*    |              |           |
|        |           | 11     | 44,76*    |              |           |
|        |           | 8      | 55,56     |              |           |
|        |           | 13     | 63,39     |              |           |
|        |           | 4      | 74,03*    |              |           |
|        |           | 15     | 48,88     |              |           |

\* Pontos excluídos da análise.

Fonte: elaborada pela autora.

Após o tratamento dos dados, os pontos considerados coerentes foram submetidos a uma nova análise de correlação e observaram-se resultados com correlação mais adequada entre a profundidade de macrotextura e a porcentagem drenada de líquido ( $R=0,72$ ), como mostram as Figuras 28 (a) e (b). Assim como na literatura, há melhor resultado de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para a regressão polinomial.

Figura 28 – Segundo teste de Regressão Linear Hm *versus* % Drenada do MRAF pelo método do *software* Matlab



Fonte: elaborada pela autora.

O teste estatístico de regressão linear gerou uma equação explicativa dos modelos linear e polinomial (Equação 5). Para verificação dos dados, substituíram-se na equação os valores da porcentagem drenada para previsão da profundidade de macrotextura no modelo

linear. A Tabela 8 demonstra a profundidade de macrotextura medida em campo e a prevista pelo modelo, assim como sua classificação de acordo com a macrotextura.

$$Hm (\text{modelo}) = 0,0136 * (\%drenada) + 0,2370 \quad (5)$$

Tabela 8 – Classificação da profundidade da macrotextura de campo *versus* modelo do MRAF

| Pontos | Hm (mm) – campo | Classificação – campo | Hm (mm) – modelo | Classificação – modelo |
|--------|-----------------|-----------------------|------------------|------------------------|
| 5*     | 0,68            | Média                 | 1,00             | Aberta                 |
| 14     | 0,72            | Média                 | 0,79             | Média                  |
| 1*     | 0,77            | Média                 | 0,89             | Aberta                 |
| 2      | 0,82            | Aberta                | 0,95             | Aberta                 |
| 6      | 0,85            | Aberta                | 0,96             | Aberta                 |
| 12     | 0,95            | Aberta                | 0,89             | Aberta                 |
| 3      | 0,95            | Aberta                | 1,00             | Aberta                 |
| 9      | 1,06            | Aberta                | 0,99             | Aberta                 |
| 10     | 1,15            | Aberta                | 1,10             | Aberta                 |
| 16     | 1,19            | Aberta                | 0,90             | Aberta                 |
| 11     | 1,30            | Muito aberta          | 1,51             | Muito aberta           |
| 8*     | 1,42            | Muito aberta          | 1,09             | Aberta                 |
| 13     | 1,55            | Muito aberta          | 1,36             | Muito aberta           |

\* Pontos não foi possível prever a classificação de macrotextura do revestimento.

Fonte: elaborada pela autora.

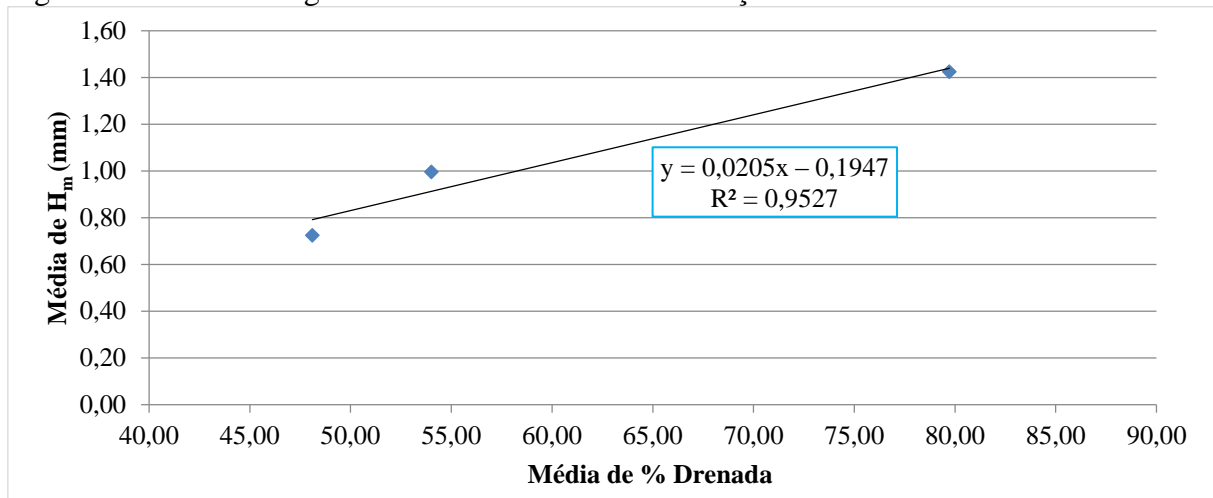
Como pode-se observar na Tabela 8, nos pontos em negrito o modelo não consegue prever a classificação de macrotextura do revestimento. Porém, esse fenômeno só acontece em três pontos. Assim, a equação do modelo consegue ser aplicada para 77% dos pontos. No entanto, quando se observa as médias por classificação, é possível alcançar um coeficiente de determinação de 0,95, encontrados na Tabela 9 e na Figura 29.

Tabela 9 – Médias por classificação no MRAF

| Pontos | %Drenada | Hm (mm) | Classificação | Hm (mm) | % Drenado média | Média de Hm (mm) |
|--------|----------|---------|---------------|---------|-----------------|------------------|
| 5      | 56,17    | 0,68    |               |         |                 |                  |
| 14     | 40,43    | 0,72    | Média         |         | 48,11           | 0,72             |
| 2      | 47,72    | 0,77    |               |         |                 |                  |
| 6      | 52,46    | 0,82    |               |         |                 |                  |
| 3      | 53,47    | 0,85    |               |         |                 |                  |
| 9      | 48,12    | 0,95    |               |         |                 |                  |
| 10     | 56,31    | 0,95    | Aberta        |         | 54,03           | 1,00             |
| 8      | 55,56    | 1,06    |               |         |                 |                  |
| 13     | 63,39    | 1,15    |               |         |                 |                  |
| 15     | 48,88    | 1,19    |               |         |                 |                  |
| 18     | 93,56    | 1,3     |               |         |                 |                  |
| 7      | 63,06    | 1,42    | Muito Aberta  |         | 79,72           | 1,42             |
| 17     | 82,55    | 1,55    |               |         |                 |                  |

Fonte: elaborada pela autora.

Figura 29 – Teste de regressão entre médias de classificação MRAF



Fonte: elaborada pela autora.

Para o CAUQ, seguiu-se o mesmo método aplicado ao MRAF. Então, foi determinado um limiar médio para as imagens de CAUQ dos *frames* 01 e 40. O limiar ótimo dos *frames* foram, respectivamente, de 0,72 e 0,62. Calculou-se também a quantidade de *pixels* brancos para o limiar coincidente de 0,65, cuja quantidade de *pixels* brancos presentes para os *frames* 01 e 40 é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Quantidade de *pixels* brancos do CAUQ

| Pontos                   | Quantidade de <i>pixels</i><br>Frame 01 | Quantidade de <i>pixels</i><br>Frame 40 | Pontos                   | Quantidade de <i>pixels</i><br>Frame 01 | Quantidade de <i>pixels</i><br>Frame 40 |
|--------------------------|---|---|--------------------------|---|---|
| 20                       | 156390                                  | 93012                                   | 32                       | 159524                                  | 60318                                   |
| 21                       | 157652                                  | 80885                                   | 33                       | 116940                                  | 74581                                   |
| 22                       | 159367                                  | 108304                                  | 34                       | 107450                                  | 60168                                   |
| 23                       | 159336                                  | 80902                                   | 35                       | 121632                                  | 67276                                   |
| 24                       | 154429                                  | 76202                                   | 37                       | 151880                                  | 95220                                   |
| 25                       | 17190                                   | 35579                                   | 38                       | 115264                                  | 73524                                   |
| 27                       | 156963                                  | 96930                                   | 39                       | 155580                                  | 90021                                   |
| 28                       | 117941                                  | 80098                                   | 40                       | 148142                                  | 88949                                   |
| 31                       | 155325                                  | 78744                                   |                          |   |   |
| Média (Frame 01)         |   | 135941,47                               | Média (Frame 40)         |   | 78865,47                                |
| Desvio Padrão (Frame 01) |   | 35986,74                                | Desvio Padrão (Frame 40) |   | 17051,49                                |
| Máximo (Frame 01)        |   | 171928,21                               | Máximo (Frame 40)        |   | 95916,96                                |
| Mínimo (Frame 01)        |   | 99954,73                                | Mínimo (Frame 40)        |   | 61813,98                                |

Fonte: elaborada pela autora.

Após a determinação o limiar de 0,65 procedeu-se o cálculo da capacidade drenante do revestimento. A porcentagem drenada de líquido para cada ponto encontra-se na Tabela 11. Como o esperado, o revestimento de CAUQ teve a média de porcentagem drenada de 57,28%, com desvio padrão de 7,92, menor do que a média do MRAF de 59,51%. A pouca diferença de porcentagem pode ter acontecido, devido à alta variação do CAUQ na sua classificação de macrotextura e, conseqüentemente, na % drenada. Baixo valores de

porcentagem drenada no MRAF, como altos valores no CAUQ podem ter interferido nas suas respectivas médias.

Tabela 11 – Porcentagem drenada do CAUQ

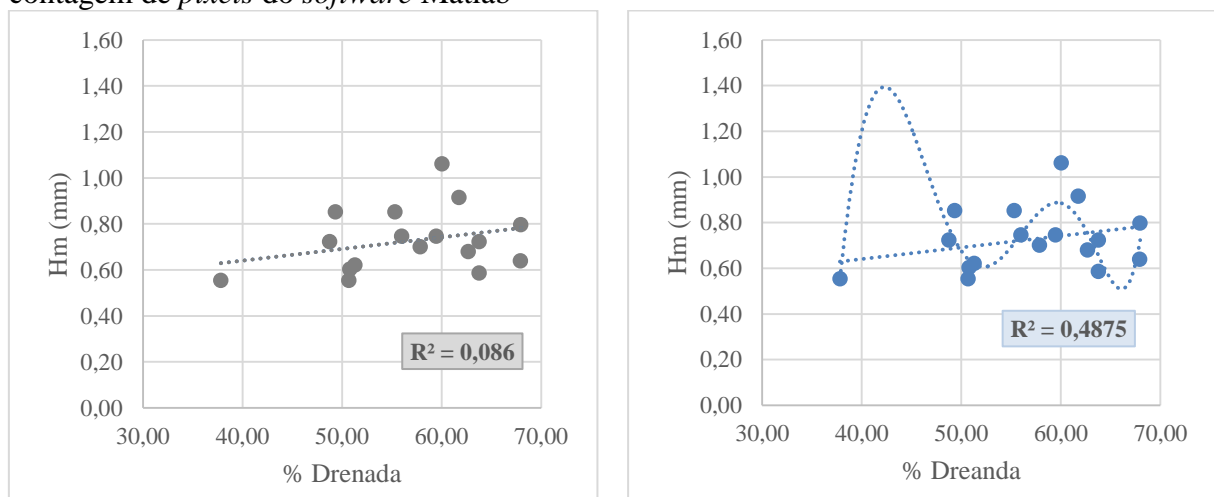
| CAUQ   |           |        |           |
|--------|-----------|--------|-----------|
| Pontos | % Drenada | Pontos | % Drenada |
| 20     | 59,47     | 31     | 37,81     |
| 21     | 51,31     | 32     | 63,78     |
| 22     | 67,96     | 33     | 56,00     |
| 23     | 50,77     | 34     | 55,31     |
| 24     | 49,34     | 35     | 48,76     |
| 25     | 61,75     | 37     | 62,69     |
| 27     | 67,91     | 38     | 63,79     |
| 28     | 50,70     | 39     | 57,86     |
| 31     | 37,81     | 40     | 60,04     |

Média – 57,28%  
Desvio padrão – 7,92

Fonte: elaborada pela autora.

Com base na profundidade de macrotextura e a porcentagem drenada, verificou-se a correlação entre os métodos ( $R = 0,29$ ). Porém pode se observar uma baixa correlação. Então, realizou-se um teste estatístico de regressão linear (Figura 30) para a determinação do  $R^2$  e a equação explicativa do modelo, que também mostrou fraca relação entre os dados.

Figura 30 – Teste de Regressão Linear Hm versus % Drenada do CAUQ pelo método de contagem de *pixels* do *software* Matlab



(a) Equação linear

(b) Equação polinomial

Fonte: elaborada pela autora.

O modelo estatístico não explicou adequadamente o fenômeno para os dados de CAUQ. Então, seguiu-se com a verificação do modelo para entendimento do fenômeno. Substituíram-se os dados de porcentagem drenada na equação explicativa do modelo

(Equação 6). Na Tabela 12 está demonstrado a profundidade de macrotextura medida em campo e a prevista pela equação, assim como suas respectivas classificações.

$$Hm (\text{modelo}) = 0,0051 * (\%drenada) + 0,4383 \quad (6)$$

Tabela 12 – Classificação de macrotextura de campo *versus* modelo do CAUQ

| Pontos | Hm (mm) – campo | Classificação – campo | Hm (mm) – modelo | Classificação – modelo |
|--------|-----------------|-----------------------|------------------|------------------------|
| 31     | 0,55            | Média                 | 0,70             | Média                  |
| 32     | 0,55            | Média                 | 0,63             | Média                  |
| 33     | 0,58            | Média                 | 0,76             | Média                  |
| 23     | 0,60            | Média                 | 0,70             | Média                  |
| 21     | 0,62            | Média                 | 0,70             | Média                  |
| 28     | 0,64            | Média                 | 0,78             | Média                  |
| 38     | 0,68            | Média                 | 0,76             | Média                  |
| 39     | 0,70            | Média                 | 0,73             | Média                  |
| 36     | 0,72            | Média                 | 0,69             | Média                  |
| 37     | 0,72            | Média                 | 0,76             | Média                  |
| 20     | 0,75            | Média                 | 0,74             | Média                  |
| 34     | 0,75            | Média                 | 0,72             | Média                  |
| 22     | 0,80            | Média                 | 0,78             | Média                  |
| 24     | 0,85            | Aberta                | 0,69             | Média                  |
| 35     | 0,85            | Aberta                | 0,72             | Média                  |
| 26     | 0,91            | Aberta                | 0,75             | Média                  |
| 40     | 1,06            | Aberta                | 0,74             | Média                  |

Fonte: elaborada pela autora.

Assim como o MRAF, no CAUQ, mesmo com baixas correlações entre os métodos, é possível observar que o modelo consegue prever a classificação da macrotextura em cerca de 76% dos pontos. Todavia o modelo não consegue ser satisfatório nas macrotextura abertas, isso se deve à amplitude do intervalo de profundidade de areia na classificação da macrotextura, mas que seria um fator a favor da segurança das operações aeroportuárias. No entanto, quando se observa as médias por classificação, é possível alcançar um coeficiente de determinação de 1, encontrados na Tabela 13 e na Figura 31.

Tabela 13 – Médias por classificação no CAUQ

| Pontos | %Drenada | Hm (mm) | Classificação | Hm (mm) | % Drenado média | Média de Hm (mm) |
|--------|----------|---------|---------------|---------|-----------------|------------------|
| 32     | 50,70    | 0,55    |               |         |                 |                  |
| 34     | 63,78    | 0,58    |               |         |                 |                  |
| 24     | 50,77    | 0,60    |               |         |                 |                  |
| 22     | 51,31    | 0,62    |               |         |                 |                  |
| 38     | 62,69    | 0,68    |               |         |                 |                  |
| 41     | 57,86    | 0,70    | Média         |         | 57,37           | 0,66             |
| 40     | 63,79    | 0,72    |               |         |                 |                  |
| 21     | 59,47    | 0,75    |               |         |                 |                  |
| 35     | 56,00    | 0,75    |               |         |                 |                  |
| 25     | 49,34    | 0,85    |               |         |                 |                  |

(continua)

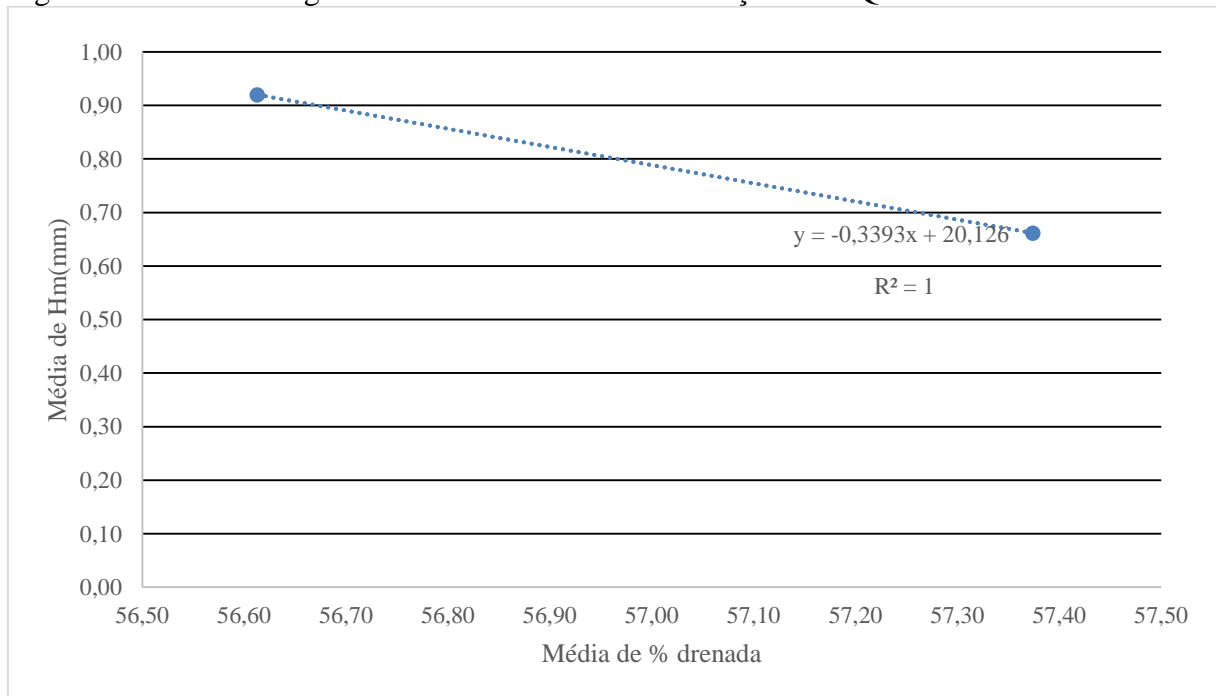
Tabela 13 – Médias por classificação no CAUQ

| Pontos | %Drenada | Hm (mm) | Classificação | Hm (mm) | % Drenado média | Média de Hm (mm) |
|--------|----------|---------|---------------|---------|-----------------|------------------|
| 36     | 55,31    | 0,85    | Aberta        |         | 79,72           | 1,42             |
| 28     | 61,75    | 0,91    |               |         |                 |                  |
| 42     | 60,04    | 1,06    |               |         |                 |                  |

(conclusão)

Fonte: elaborada pela autora.

Figura 31 – Teste de regressão entre médias de classificação CAUQ

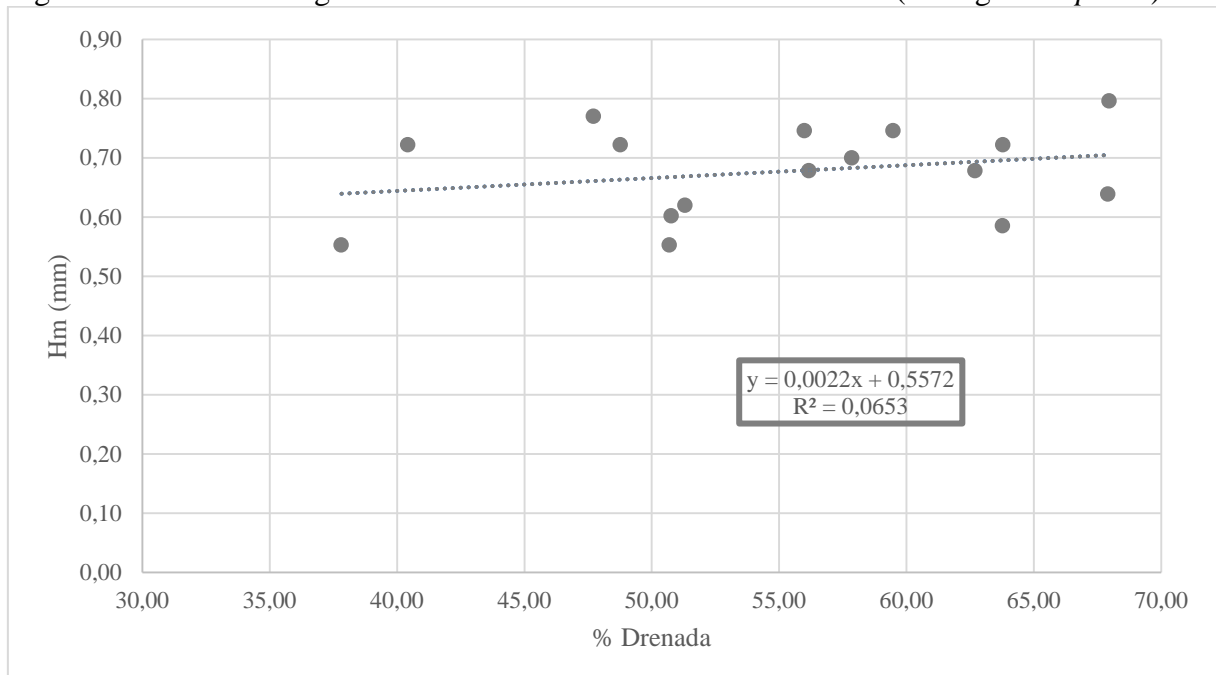


Fonte: elaborada pela autora.

#### 4.2.2.2 Análise pela classificação da macrotextura

Seguindo em uma segunda abordagem de análise, optou-se por agrupar os dados de macrotextura de acordo com sua classificação, a fim de avaliar a drenagem independentemente do tipo de revestimento. Porém, esse agrupamento só pode ser realizado com as classificações média e aberta, pois são as encontradas in situ nos dois revestimentos.

Iniciou-se com os dados classificados como macrotextura média. Após o agrupamento, iniciou-se com a análise estatística, que assim como na primeira abordagem obteve fracas correlações (Figura 32).

Figura 32 – Teste de Regressão Linear Hm médio *versus* % Drenada (contagem de *pixels*)

Fonte: elaborada pela autora.

Então, aplicou-se a equação explicativa do modelo a fim de investigar sua capacidade de previsão da classificação da macrotextura. A Tabela 14 apresenta os dados de porcentagem drenada, valores e classificação da macrotextura obtida pelo ensaio de mancha de areia e os valores e classificação da macrotextura obtidos pela equação. Pode-se observar que a equação consegue prever a classificação da macrotextura em 100% dos pontos.

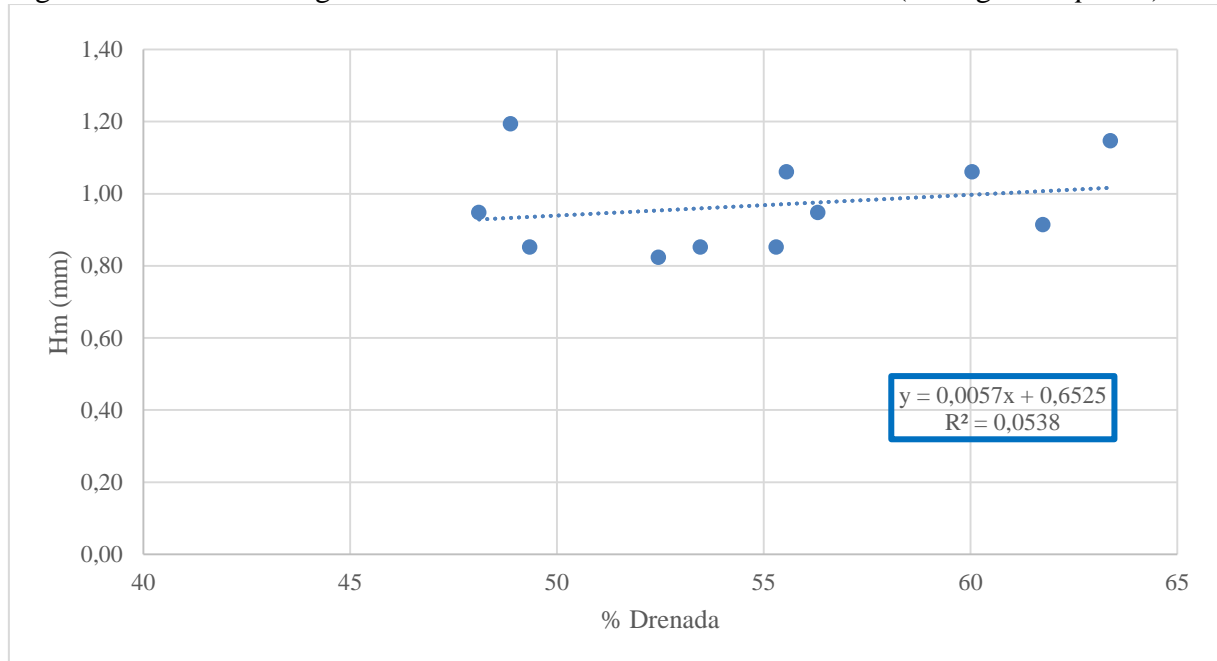
Tabela 14 – Classificação de macrotextura de campo *versus* modelo da classificação de macrotextura média

| Pontos | % drenada | Hm (mm) - campo | Classificação - campo | Hm (mm) - modelo | Classificação - modelo |
|--------|-----------|-----------------|-----------------------|------------------|------------------------|
| 5      | 56,17     | 0,68            | Média                 | 0,68             | Média                  |
| 14     | 40,43     | 0,72            | Média                 | 0,65             | Média                  |
| 1      | 47,72     | 0,77            | Média                 | 0,66             | Média                  |
| 32     | 50,70     | 0,55            | Média                 | 0,67             | Média                  |
| 33     | 37,81     | 0,55            | Média                 | 0,64             | Média                  |
| 34     | 63,78     | 0,58            | Média                 | 0,70             | Média                  |
| 24     | 50,77     | 0,60            | Média                 | 0,67             | Média                  |
| 22     | 51,31     | 0,62            | Média                 | 0,67             | Média                  |
| 29     | 67,91     | 0,64            | Média                 | 0,71             | Média                  |
| 38     | 62,69     | 0,68            | Média                 | 0,70             | Média                  |
| 41     | 57,86     | 0,70            | Média                 | 0,68             | Média                  |
| 37     | 48,76     | 0,72            | Média                 | 0,66             | Média                  |
| 40     | 63,79     | 0,72            | Média                 | 0,70             | Média                  |
| 21     | 59,47     | 0,75            | Média                 | 0,69             | Média                  |
| 35     | 56,00     | 0,75            | Média                 | 0,68             | Média                  |
| 23     | 67,96     | 0,80            | Média                 | 0,71             | Média                  |

Fonte: elaborada pela autora.

Para a macrotextura classificada como aberta seguiu-se o mesmo procedimento. Iniciou-se com os testes estatísticos, em que seus resultados também apresentaram fracas correlações que estão apresentadas na Figura 33.

Figura 33 – Teste de Regressão Linear Hm aberto *versus* % Drenada (contagem de *pixels*)



Fonte: elaborada pela autora.

Seguindo os procedimentos, aplicou-se a equação explicativa do modelo. Na Tabela 15 encontra-se a porcentagem drenada, os valores e classificação em campo da macrotextura e os valores e classificação encontrados pelo modelo. Observa-se que, mesmo com fraca correlação, o modelo consegue acertar a classificação em 100% dos pontos.

Tabela 15 – Classificação de macrotextura de campo *versus* modelo da classificação de macrotextura aberta



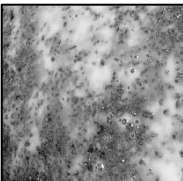
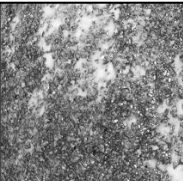
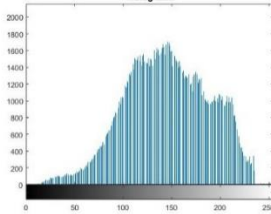
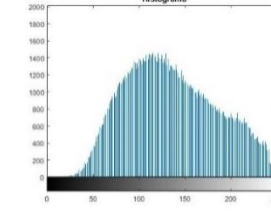

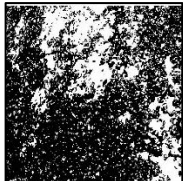
| Pontos | % drenada | Hm (mm) - campo | Classificação - campo | Hm (mm) - modelo | Classificação - modelo |
|--------|-----------|-----------------|-----------------------|------------------|------------------------|
| 2      | 52,45     | 0,82            | Aberta                | 0,95             | Aberta                 |
| 6      | 53,47     | 0,85            | Aberta                | 0,96             | Aberta                 |
| 12     | 48,11     | 0,95            | Aberta                | 0,93             | Aberta                 |
| 3      | 56,31     | 0,95            | Aberta                | 0,97             | Aberta                 |
| 9      | 55,55     | 1,06            | Aberta                | 0,97             | Aberta                 |
| 10     | 63,39     | 1,15            | Aberta                | 1,01             | Aberta                 |
| 16     | 48,88     | 1,19            | Aberta                | 0,93             | Aberta                 |
| 25     | 49,34     | 0,85            | Aberta                | 0,93             | Aberta                 |
| 36     | 55,31     | 0,85            | Aberta                | 0,97             | Aberta                 |
| 28     | 61,75     | 0,91            | Aberta                | 1,00             | Aberta                 |
| 42     | 60,04     | 1,06            | Aberta                | 0,99             | Aberta                 |

Fonte: elaborada pela autora.

#### 4.2.2.3 Análise representativa do PDI para os revestimentos

Detalham-se as etapas do processamento das imagens de dois pontos, sendo o primeiro ponto com revestimento tipo MRAF, ponto 17 (Tabela 16) e o segundo ponto de CAUQ, ponto 34 (Tabela 17).

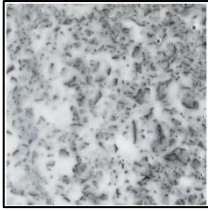
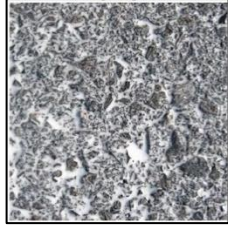
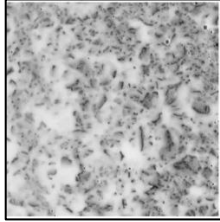
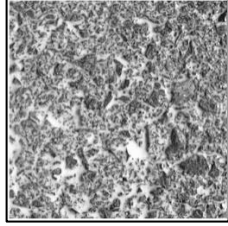
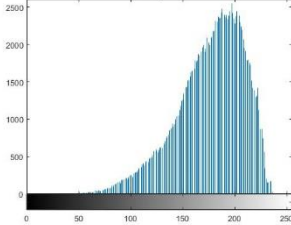
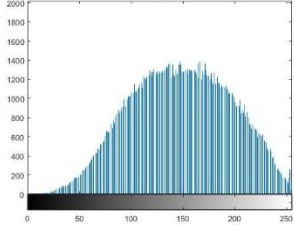

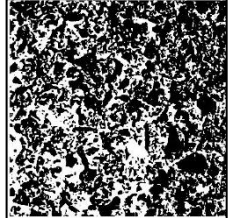
Tabela 16 – Etapas do PDI para revestimento tipo MRAF

| Etapas do PDI        | Frame 01  | Frame 40  |
|----------------------|---|---|
| Imagem original      |    |    |
| Imagem monocromática |   |   |
| Histograma           |  |  |
| Imagem binarizada    |  |  |

Fonte: elaborada pela autora.

Como observado nos procedimentos apresentados na Tabela 18, no MRAF é possível obter uma pequena lâmina d'água na saturação do revestimento, porém não o cobre por completo. Na imagem logo após a saturação (*Frame 40*), é possível perceber que há pouco acúmulo de água e essa água continua sendo drenada e decai em 78,73% desde o início. Isso ocorre devido a sua macrotextura aberta, pelos ensaios convencionais. Desse modo, conclui-se que os sulcos presentes no revestimento auxiliam numa drenagem mais rápida.

Tabela 17 – Etapas do PDI para revestimento tipo CAUQ

| Etapas do PDI        | Frame 01  | Frame 40  |
|----------------------|---|---|
| Imagem original      |    |    |
| Imagem monocromática |    |    |
| Histograma           |   |   |
| Imagem binarizada    |  |  |

Fonte: elaborada pela autora.

No CAUQ, nota-se a formação da lâmina d'água no revestimento. Este obtém uma saturação com pouca visualização dos agregados pertinente com sua macrotextura média que diminui a capacidade drenante do revestimento. Conseqüentemente, a quantidade de *pixels* brancos na primeira e na última imagem é maior do que no MRAF. O percentual drenado de água no CAUQ foi de 56,00%.

A partir das imagens binarizadas, calculou-se a soma dos *pixels* brancos dos *frames*. Para, então, calcular a porcentagem que diminuiu de *pixels* brancos que representa a parcela escoada da água. Na Tabela 18 encontra-se a quantidade de *pixels* brancos em cada *frame* e o percentual drenado nos primeiros pontos de MRAF e CAUQ.

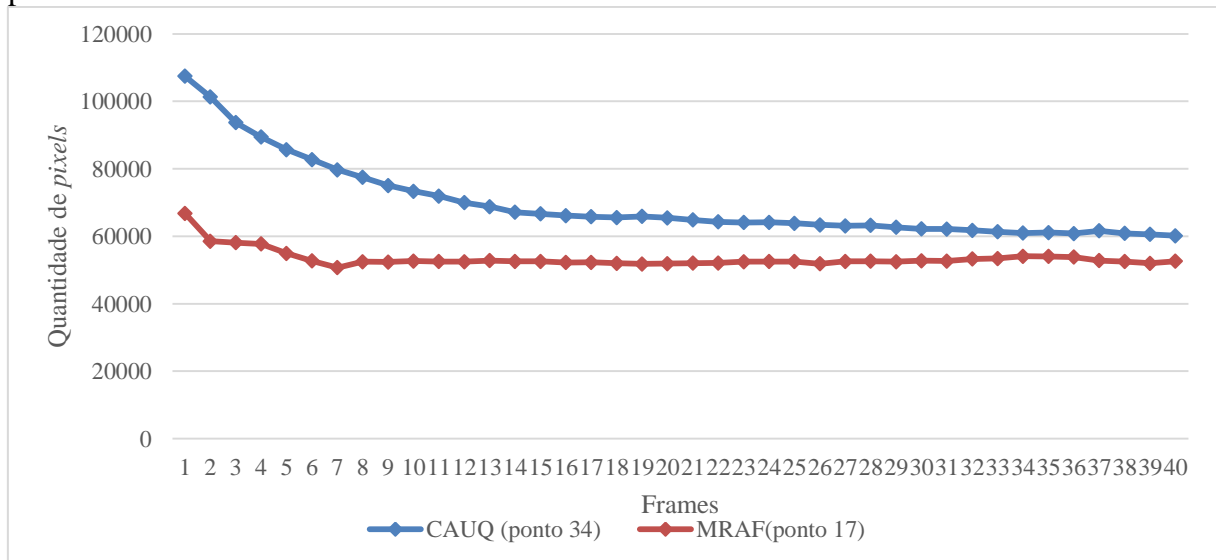
Tabela 18 – Percentual drenado de água nos pontos 17 e 34

| Revestimento/ponto | Frame 01 | Frame 40 | Percentual drenado (%) |
|--------------------|----------|----------|------------------------|
| MRAF/17            | 66.807   | 52.597   | 78,73                  |
| CAUQ/34            | 107.450  | 60.168   | 56,00                  |

Fonte: elaborada pela autora.

A Figura 34 foi plotada graficamente demonstrando a variação da quantidade de *pixels* dos dois pontos representativos (pontos 17 e 34) durante o tempo de escoamento do líquido. Pode-se observar que no MRAF há pouco acúmulo de líquido no momento inicial da saturação, isso acontece porque sua macrotextura aberta contribui para que o líquido escoe rapidamente, evitando o acúmulo no revestimento. Além disso, a baixa variação do número de *pixels* reforça a teoria de que macrotexturas mais abertas escoam líquidos rapidamente. Ao contrário disso, no CAUQ o número de *pixels* no momento inicial é maior, o que há indícios que facilita o acúmulo de líquido no revestimento.

Figura 34 – Representação do decaimento da quantidade de líquido no MRAF e CAUQ no ponto 17 e 34



Fonte: elaborada pela autora.

#### 4.2.3 Análise por contagem de pixels no software QGIS 2.18 with grass

Por meio das *toolboxes* de processamento digital de imagens disponibilizadas no *software* QGIS, seguiu-se o mesmo método de processamento por contagem de *pixels* no *software* Matlab R2017a para fim de comparação e validação dos métodos. Assim como no primeiro método apresentado, as imagens foram analisadas separadamente para cada tipo de revestimento e momento do vídeo.

##### 4.2.3.1 Microrrevestimento asfáltico a frio – análise por contagem de pixels

Seguindo as fases de PDI, para o cálculo da contagem de *pixels* brancos utilizou-se o mesmo limiar que o método pelo *software* Matlab. Sendo assim, o limiar para análise foi

de 0,61, porém o *software* QGIS utiliza a faixa de nível de cinza de 0 a 255, fazendo assim correspondência do limiar de 155,55 para o QGIS. Outra diferença entre os *softwares*, é na contagem de *pixels*, ao contrário do *software* Matlab, o QGIS conta a quantidade de *pixels* pretos da imagem. Na Tabela 19 está apresentada a quantidade de *pixels* pretos calculado pelo QGIS para os pontos com MRAF.

Tabela 19 – Quantidade de *pixels* pretos QGIS no MRAF

| <b>Pontos</b> | <b>Frame 01</b> | <b>Frame 40</b> | <b>Pontos</b> | <b>Frame 01</b> | <b>Frame 40</b> |
|---------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 1             | 61157           | 88610           | 10            | 23593           | 83186           |
| 2             | 34280           | 100010          | 11            | 1545            | 94959           |
| 3             | 14711           | 83692           | 12            | 28699           | 103300          |
| 4             | 42070           | 72696           | 13            | 30411           | 77852           |
| 5             | 582             | 70452           | 14            | 7062            | 98170           |
| 6             | 51134           | 102893          | 15            | 23934           | 93491           |
| 7             | 2990            | 60992           | 16            | 20828           | 54954           |
| 8             | 27110           | 86172           | 17            | 94594           | 106005          |
| 9             | 9133            | 87406           | 18            | 26203           | 34822           |

Fonte: elaborada pela autora.

Devido ao tratamento dos dados na contagem de *pixels* pelo Matlab, excluiu-se alguns pontos que, também, foram excluídos nesse método. Para fins de comparação entre métodos, calculou-se a quantidade de *pixels* brancos por meio da subtração de *pixels* restantes na imagem, como também a porcentagem drenada de líquido (Tabela 20).

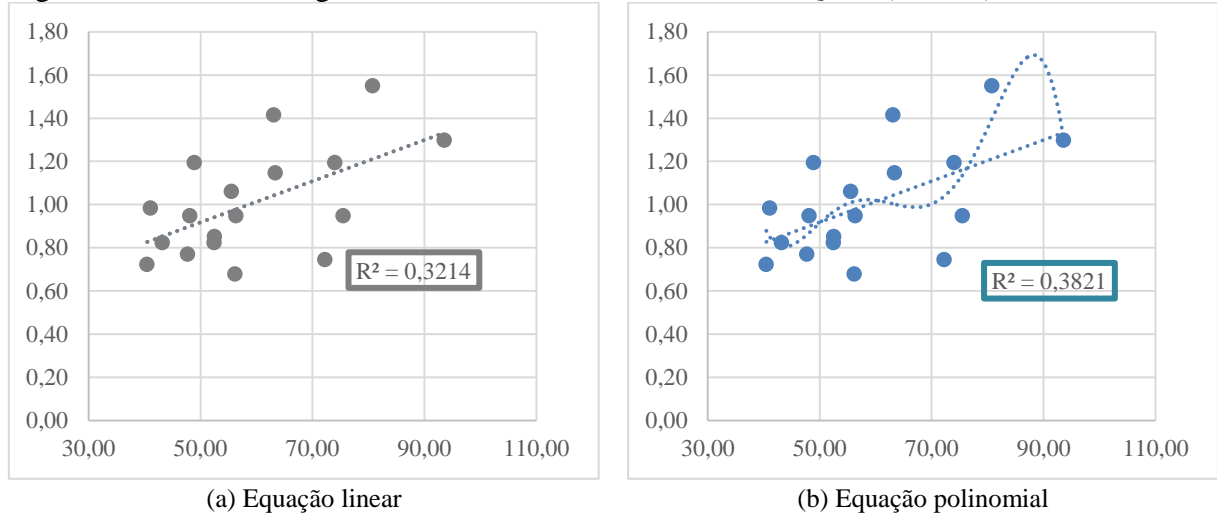
Tabela 20 – Quantidade de *pixels* brancos e % drenada QGIS no MRAF

| <b>Pontos</b> | <b>Pixels pretos</b> |                 | <b>Pixels brancos</b> |                 | <b>% Drenada QGIS</b> |
|---------------|----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|
|               | <b>Frame 01</b>      | <b>Frame 40</b> | <b>Frame 01</b>       | <b>Frame 40</b> |                       |
| 1             | 61157                | 88610           | 98843                 | 71390           | 72,23                 |
| 2             | 34280                | 100010          | 125720                | 59990           | 47,72                 |
| 3             | 14711                | 83692           | 145289                | 76308           | 52,52                 |
| 4             | 42070                | 72696           | 117930                | 87304           | 74,03                 |
| 5             | 582                  | 70452           | 159418                | 89548           | 56,17                 |
| 6             | 51134                | 102893          | 108866                | 57107           | 52,46                 |
| 7             | 2990                 | 60992           | 157010                | 99008           | 63,06                 |
| 8             | 27110                | 86172           | 132890                | 73828           | 55,56                 |
| 9             | 9133                 | 87406           | 150867                | 72594           | 48,12                 |
| 10            | 23593                | 83186           | 136407                | 76814           | 56,31                 |
| 11            | 1545                 | 94959           | 158455                | 65041           | 41,05                 |
| 12            | 28699                | 103300          | 131301                | 56700           | 43,18                 |
| 13            | 30411                | 77852           | 129589                | 82148           | 63,39                 |
| 14            | 7062                 | 98170           | 152938                | 61830           | 40,43                 |
| 15            | 23934                | 93491           | 136066                | 66509           | 48,88                 |
| 16            | 20828                | 54954           | 139172                | 105046          | 75,48                 |
| 17            | 226807               | 212597          | 66807                 | 52597           | 78,73                 |
| 18            | 26203                | 34822           | 133797                | 125178          | 93,56                 |

Fonte: elaborada pela autora.

Após o cálculo da porcentagem drenada pelo *software* QGIS, procedeu-se com as análises estatísticas. Com uma correlação de 0,57 e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,32 e 0,38 para equações linear e polinomial, respectivamente, a porcentagem drenada do MRAF pelo *software* QGIS apresenta as mesmas características encontradas pelo método do *software* Matlab por contagem de *pixels*. Os gráficos de regressão linear estão plotados na Figura 35.

Figura 35 – Teste de Regressão Linear Hm *versus* % drenada QGIS (MRAF)



Fonte: elaborada pela autora.

#### 4.2.3.2 Concreto asfáltico usinado a quente – análise por contagem de *pixels*

Assim como no trecho com MRAF, as etapas de PDI seguiram o método do Matlab por contagem de *pixels*. Utilizou-se o limiar de 0,65, transformado para a faixa de intensidade de cinza de 0 a 255, obteve-se o limiar de 167,75. Alguns pontos não foram analisados devido à exclusão destes no método do *software* Matlab, pois estes pontos apresentaram problemáticas que impossibilitaram o processamento. Na Tabela 21, está apresentado a quantidade de *pixels* pretos calculada pelo *software* somente para os pontos que foram analisados.

Tabela 21 – Quantidade de *pixels* pretos QGIS no CAUQ

| Pontos | Frame 01 | Frame 40 | Pontos | Frame 01 | Frame 40 |
|--------|----------|----------|--------|----------|----------|
| 20     | 3760     | 68499    | 32     | 604      | 101481   |
| 21     | 2485     | 80629    | 33     | 44707    | 86857    |
| 22     | 656      | 52989    | 34     | 54690    | 101378   |
| 23     | 701      | 80561    | 35     | 39697    | 94159    |
| 24     | 5986     | 85213    | 37     | 8513     | 66251    |
| 27     | 3133     | 64818    | 38     | 46281    | 87927    |
| 28     | 43807    | 81275    | 39     | 4819     | 71508    |
| 31     | 4903     | 83218    | 40     | 12306    | 72484    |

Fonte: elaborada pela autora.

Seguindo o método de contagem de *pixels*, determinou-se a quantidade *pixels* brancos das imagens a partir da quantidade de pretos. Com isso, calculou-se a porcentagem de líquido drenada, apresentada na Tabela 22.

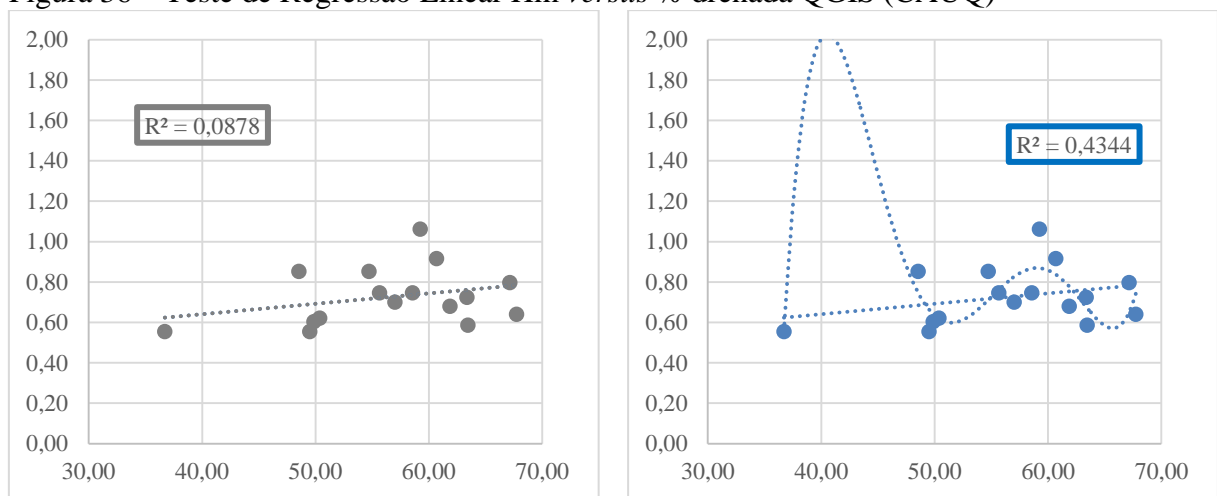
Tabela 22 – Quantidade de *pixels* brancos QGIS no CAUQ

| Pontos | <i>Pixels</i> pretos |          | <i>Pixels</i> brancos |          | % Drenada QGIS |
|--------|----------------------|----------|-----------------------|----------|----------------|
|        | Frame 01             | Frame 40 | Frame 01              | Frame 40 |                |
| 20     | 3760                 | 68499    | 156240                | 91501    | 58,56          |
| 21     | 2485                 | 80629    | 157515                | 79371    | 50,39          |
| 22     | 656                  | 52989    | 159344                | 107011   | 67,16          |
| 23     | 701                  | 80561    | 159299                | 79439    | 49,87          |
| 24     | 5986                 | 85213    | 154014                | 74787    | 48,56          |
| 27     | 3133                 | 64818    | 156867                | 95182    | 60,68          |
| 28     | 43807                | 81275    | 116193                | 78725    | 67,75          |
| 31     | 4903                 | 83218    | 155097                | 76782    | 49,51          |
| 32     | 604                  | 101481   | 159396                | 58519    | 36,71          |
| 33     | 44707                | 86857    | 115293                | 73143    | 63,44          |
| 34     | 54690                | 101378   | 105310                | 58622    | 55,67          |
| 35     | 39697                | 94159    | 120303                | 65841    | 54,73          |
| 37     | 8513                 | 66251    | 151487                | 93749    | 61,89          |
| 38     | 46281                | 87927    | 113719                | 72073    | 63,38          |
| 39     | 4819                 | 71508    | 155181                | 88492    | 57,03          |
| 40     | 12306                | 72484    | 147694                | 87516    | 59,25          |

Fonte: elaborada pela autora.

Após o cálculo da porcentagem drenada pelo *software* QGIS, procedeu-se com as análises estatísticas. Assim como no método por contagem de *pixels* pelo *software* Matlab, a porcentagem drenada apresentou fraca correlação com a profundidade de macrotextura. Com uma correlação de 0,29 e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,08 e 0,43 para equações linear e polinomial, respectivamente. Os gráficos de regressão linear estão plotados na Figura 36.

Figura 36 – Teste de Regressão Linear Hm *versus* % drenada QGIS (CAUQ)



(a) Equação linear

(b) Equação polinomial

Fonte: elaborada pela autora.

#### 4.2.4 Análise pelo software Matlab por Transformada de Fourier

O código desenvolvido no *software* Matlab para avaliação da drenagem superficial por Transformada de Fourier (FFT) elaborou um gráfico da soma da distribuição da frequência dos anéis. A partir desse gráfico, foi possível a análise do percentual drenante do pavimento. Assim como nos outros métodos, foram realizadas duas abordagens de análises, a primeira se avaliou a capacidade do modelo de prever a classificação da macrotextura agrupando os dados pelo tipo de revestimento e a segunda agruparam-se os dados pela classificação da macrotextura obtida em campo.

Iniciou-se com a análise dos dados agrupados pelo tipo de revestimento. Na Tabela 23 estão apresentadas as áreas dos gráficos e os percentuais drenantes obtidos pela Transformada de Fourier. Assim como nos métodos anteriores, retiraram-se pontos problemáticos, que estão assinalados por asteriscos.

Tabela 23 – Áreas dos gráficos e % drenada FFT

| MRAF   |                 |            |        | CAUQ   |                 |            |       |
|--------|-----------------|------------|--------|--------|-----------------|------------|-------|
| Pontos | Área do gráfico |            |        | Pontos | Área do gráfico |            |       |
|        | Frame 01        | Frame 40   | %      |        | Frame 01        | Frame 40   | %     |
| 1      | 85.753,19       | 175.947,81 | 48,74  | 20     | 45.237,58       | 172.703,93 | 26,19 |
| 2      | 105.468,87      | 160.995,30 | 65,51  | 21     | 46.793,54       | 142.528,39 | 32,83 |
| 3      | 111.374,14      | 192.874,26 | 57,74  | 22     | 19.967,78       | 151.979,42 | 13,14 |
| 4      | 72.985,49       | 162.043,11 | 45,04  | 23     | 9.789,12        | 144.657,13 | 6,77  |
| 5      | 31.053,53       | 140.070,42 | 22,17  | 24     | 48.333,90       | 190.649,99 | 25,35 |
| 6      | 81.956,44       | 167.534,28 | 48,92  | 27     | 95.334,76       | 145.621,56 | 65,47 |
| 7      | 73.708,78       | 166.430,61 | 44,29  | 28     | 141.026,87      | 181.592,69 | 77,66 |
| 8      | 67.731,74       | 231.563,76 | 29,25  | 31     | 42.112,85       | 159.629,37 | 26,38 |
| 9      | 45.773,29       | 108.986,43 | 42,00  | 32     | 12.779,11       | 133.233,51 | 9,59  |
| 10     | 96.745,61       | 188.867,42 | 51,22  | 33     | 79.420,73       | 118.356,65 | 67,10 |
| 11     | 78.288,53       | 169.937,83 | 46,07  | 34     | 100.048,54      | 170.322,75 | 58,74 |
| 12     | 54.929,72       | 126.316,51 | 43,49  | 35     | 129.042,60      | 185.811,38 | 69,45 |
| 13     | 84.638,37       | 158.809,75 | 53,30  | 37     | 73.099,37       | 149.395,55 | 48,93 |
| 14     | 82.213,54       | 169.220,20 | 48,58  | 38     | 96.813,18       | 137.776,49 | 70,27 |
| 15     | 72.520,28       | 140.128,69 | 51,75  | 39     | 38.491,78       | 123.256,23 | 31,23 |
| 16     | 97.078,50       | 168.524,51 | 57,60  | 40     | 97.585,79       | 179.555,05 | 54,35 |
| 17     | 137.316,39      | 191.263,60 | 71,79  |        |                 |            |       |
| 18*    | 113.013,51      | 81.405,76  | 138,83 |        |                 |            |       |
| 19*    | 135.470,45      | 195.649,65 | 69,24  |        |                 |            |       |

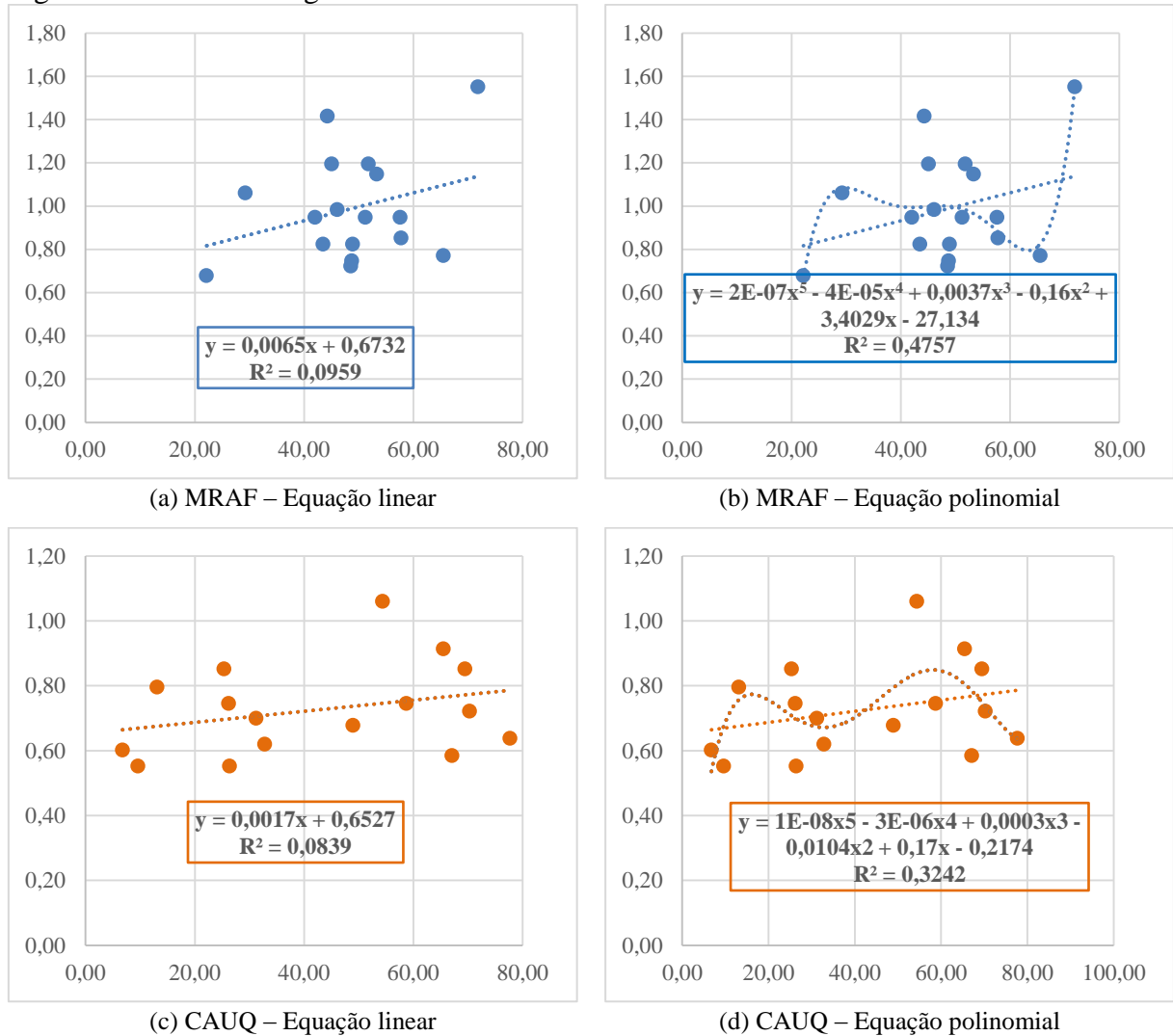
\* Pontos excluídos da análise.

Fonte: elaborada pela autora.

Seguiu-se, então, para a verificação da correlação entre o método de FFT e profundidade de macrotextura. O teste estatístico não apresentou resultados satisfatórios, ocasionando numa correlação de 0,30 e 0,28. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para o MRAF foi de 0,09 para equação linear e 0,47 para equação polinomial. Para o CAUQ,  $R^2$  assumiu os valores de 0,08 e 0,32, para as equações linear e polinomial, respectivamente

(Figura 37). E assim como o descrito na literatura, os resultados são satisfatórios quando se emprega equações polinomiais.

Figura 37 – Teste de Regressão linear Hm versus % drenada FFT



Fonte: elaborada pela autora.

Assim como no método pelo Matlab, calculou-se a profundidade de macrotextura a partir da equação explicativa do modelo para cada revestimento. Na Tabela 24, encontram-se a classificação da macrotextura obtida em campo e a classificação pela equação preditiva. É possível observar que mesmo com fraca correlação entre os modelos, a equação consegue prever a classificação em cerca de 64% e 75% dos pontos de MRAF e CAUQ, respectivamente.

Tabela 24 – Classificação de macrotextura campo *versus* modelo FFT por tipo de revestimento

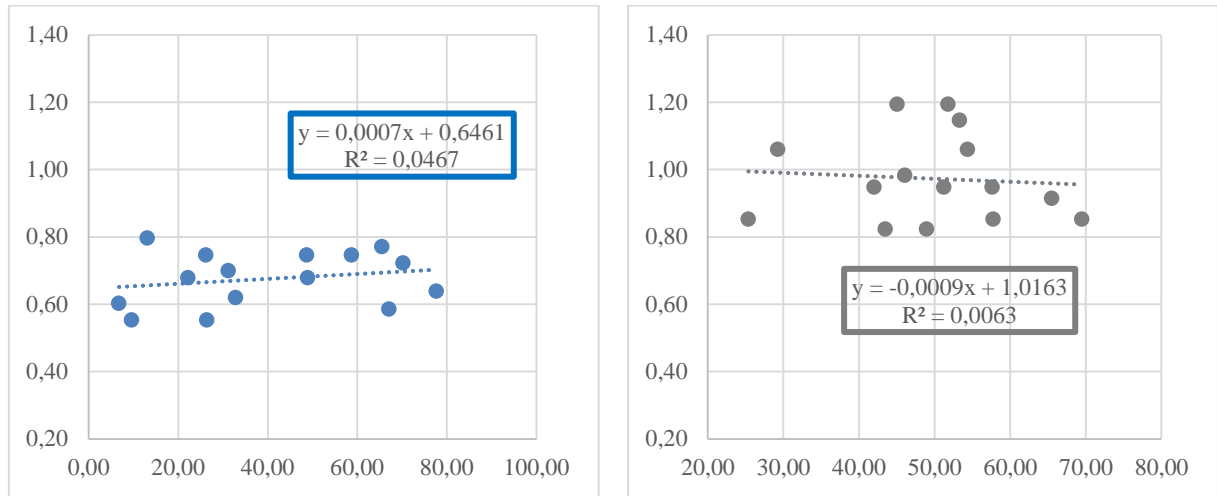
| MRAF             |                        |                   |                         | CAUQ             |                        |                   |                         |
|------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|
| Hm (mm)<br>campo | Classificação<br>campo | Hm (mm)<br>modelo | Classificação<br>modelo | Hm (mm)<br>campo | Classificação<br>campo | Hm (mm)<br>modelo | Classificação<br>modelo |
| 0,75             | Média                  | 0,99              | Aberta                  | 0,75             | Média                  | 0,70              | Média                   |
| 0,77             | Média                  | 1,10              | Aberta                  | 0,62             | Média                  | 0,71              | Média                   |
| 0,85             | Aberta                 | 1,05              | Aberta                  | 0,80             | Média                  | 0,68              | Média                   |
| 1,19             | Aberta                 | 0,97              | Aberta                  | 0,60             | Média                  | 0,66              | Média                   |
| 0,68             | Média                  | 0,82              | Aberta                  | 0,85             | Aberta                 | 0,70              | Média                   |
| 0,82             | Aberta                 | 0,99              | Aberta                  | 0,91             | Aberta                 | 0,76              | Média                   |
| 1,42             | Muito aberta           | 0,96              | Aberta                  | 0,64             | Média                  | 0,78              | Média                   |
| 1,06             | Aberta                 | 0,86              | Aberta                  | 0,55             | Média                  | 0,70              | Média                   |
| 0,95             | Aberta                 | 0,95              | Aberta                  | 0,55             | Média                  | 0,67              | Média                   |
| 0,95             | Aberta                 | 1,01              | Aberta                  | 0,58             | Média                  | 0,77              | Média                   |
| 0,98             | Aberta                 | 0,97              | Aberta                  | 0,75             | Média                  | 0,75              | Média                   |
| 0,82             | Aberta                 | 0,96              | Aberta                  | 0,85             | Aberta                 | 0,77              | Média                   |
| 1,15             | Aberta                 | 1,02              | Aberta                  | 0,68             | Média                  | 0,74              | Média                   |
| 0,72             | Média                  | 0,99              | Aberta                  | 0,72             | Média                  | 0,77              | Média                   |
| 1,19             | Aberta                 | 1,01              | Aberta                  | 0,70             | Média                  | 0,71              | Média                   |
| 0,95             | Aberta                 | 1,05              | Aberta                  | 1,06             | Aberta                 | 0,75              | Média                   |
| 1,55             | Muito aberta           | 1,14              | Aberta                  | -                | -                      | -                 | -                       |

Fonte: elaborada pela autora.

A diferença na granulometria das misturas asfálticas que compõem os revestimentos pode ter influenciado essa diferença de comportamento do Método FFT, em que a classificação da macrotextura do MRAF não atingiu o patamar de 70% como nos outros métodos. Esse fenômeno pode ter acontecido pela forma em que o FFT avalia a macrotextura, por variação da luminância. No revestimento tipo MRAF é perceptível que a granulometria dos agregados é menor que no revestimento de CAUQ. Assim, quando o algoritmo processa a imagem os agregados maiores conseguem ter maior diferença de luminância, ou seja, maior percepção entre *pixels* brancos e pretos.

Para a segunda abordagem de análise, os dados foram agrupados de acordo com a classificação da macrotextura de campo e inicialmente foram feitos os testes estatísticos. Seguindo o comportamento dos outros métodos empregados, os testes mostram uma fraca correlação tanto para a classificação de macrotextura média quanto para a classificação de macrotextura aberta. A Figura 38 demonstra as equações explicativas e seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ).

Figura 38 – Teste de Regressão linear Hm *versus* % drenada FFT pela classificação da macrotextura



(a) Classificação de macrotextura aberta

(b) Classificação de macrotextura fechada

Fonte: elaborada pela autora.

Mesmo com as fracas correlações, aplicou-se a equação explicativa do modelo. Na Tabela 25 encontra-se a porcentagem drenada, os valores e a classificação em campo da macrotextura e os valores e classificação encontrados pelo modelo. Observa-se que mesmo com fraca correlação o modelo consegue acertar a classificação em 100% dos pontos tanto para a classificação de macrotextura média quanto para a macrotextura aberta.

Tabela 25 – Classificação macrotextura campo *versus* modelo FFT por análise da classificação da macrotextura

(continua)

| Pontos | % drenada | Hm (mm) - campo | Classificação - campo | Hm (mm) - modelo | Classificação - modelo |
|--------|-----------|-----------------|-----------------------|------------------|------------------------|
| 1      | 48,74     | 0,75            | Média                 | 0,68             | Média                  |
| 2      | 65,51     | 0,77            | Média                 | 0,69             | Média                  |
| 5      | 22,17     | 0,68            | Média                 | 0,66             | Média                  |
| 20     | 26,19     | 0,75            | Média                 | 0,66             | Média                  |
| 21     | 32,83     | 0,62            | Média                 | 0,67             | Média                  |
| 22     | 13,14     | 0,80            | Média                 | 0,66             | Média                  |
| 23     | 6,77      | 0,60            | Média                 | 0,65             | Média                  |
| 28     | 77,66     | 0,64            | Média                 | 0,70             | Média                  |
| 31     | 26,38     | 0,55            | Média                 | 0,66             | Média                  |
| 32     | 9,59      | 0,55            | Média                 | 0,65             | Média                  |
| 33     | 67,10     | 0,58            | Média                 | 0,69             | Média                  |
| 34     | 58,74     | 0,75            | Média                 | 0,69             | Média                  |
| 37     | 48,93     | 0,68            | Média                 | 0,68             | Média                  |
| 38     | 70,27     | 0,72            | Média                 | 0,70             | Média                  |
| 39     | 31,23     | 0,70            | Média                 | 0,67             | Média                  |
| 3      | 57,74     | 0,85            | Aberta                | 0,96             | Aberta                 |
| 4      | 45,04     | 1,19            | Aberta                | 0,98             | Aberta                 |
| 6      | 48,92     | 0,82            | Aberta                | 0,97             | Aberta                 |
| 8      | 29,25     | 1,06            | Aberta                | 0,99             | Aberta                 |
| 9      | 42,00     | 0,95            | Aberta                | 0,98             | Aberta                 |
| 10     | 51,22     | 0,95            | Aberta                | 0,97             | Aberta                 |
| 11     | 46,07     | 0,98            | Aberta                | 0,97             | Aberta                 |
| 12     | 43,49     | 0,82            | Aberta                | 0,98             | Aberta                 |

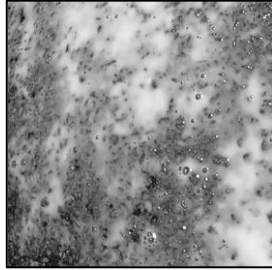
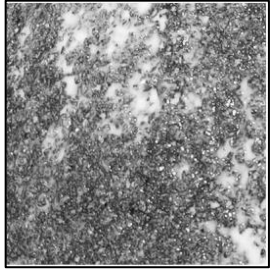
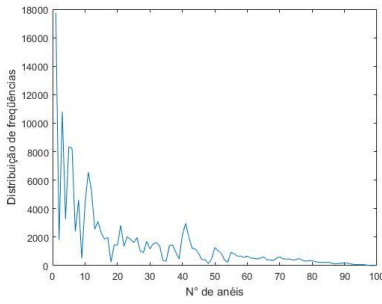
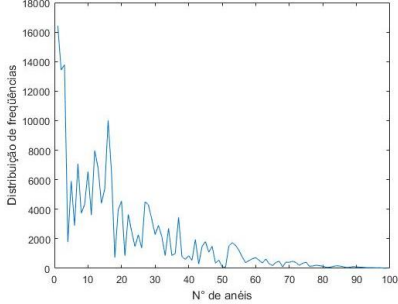
Tabela 25 – Classificação macrotextura campo *versus* modelo FFT por análise da classificação da macrotextura

| (conclusão) |           |                 |                       |                  |                        |  |
|-------------|-----------|-----------------|-----------------------|------------------|------------------------|--|
| Pontos      | % Drenada | Hm (mm) - campo | Classificação - campo | Hm (mm) - modelo | Classificação - modelo |  |
| 13          | 53,30     | 1,15            | Aberta                | 0,97             | Aberta                 |  |
| 15          | 51,75     | 1,19            | Aberta                | 0,97             | Aberta                 |  |
| 16          | 57,60     | 0,95            | Aberta                | 0,96             | Aberta                 |  |
| 24          | 25,35     | 0,85            | Aberta                | 0,99             | Aberta                 |  |
| 27          | 65,47     | 0,91            | Aberta                | 0,96             | Aberta                 |  |
| 35          | 69,45     | 0,85            | Aberta                | 0,95             | Aberta                 |  |
| 40          | 54,35     | 1,06            | Aberta                | 0,97             | Aberta                 |  |

Fonte: elaborada pela autora.

Dois pontos representativos (pontos 17 e 34) do microrrevestimento asfáltico a frio e concreto asfáltico usinado a quente que foram analisados encontram-se representados nas imagens e os gráficos que representam os *frames* inicial e final, sendo o primeiro revestimento tipo MRAF (Tabela 26) e o primeiro ponto de CAUQ (Tabela 27).

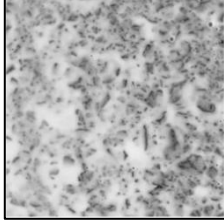
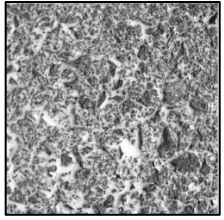
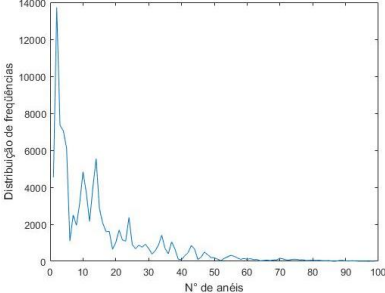
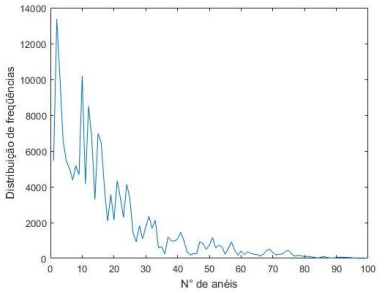
Tabela 26 – Aplicação da FFT no MRAF

| Etapas   | Frame 01  | Frame 40  |
|--|---|---|
| Imagem original  |  |  |
| Gráfico de distribuição de frequências <i>versus</i> quantidade de anéis |  |  |

Fonte: elaborada pela autora.

Como pode-se observar na Tabela 29, no MRAF as distribuições de frequência são altas. Os picos de frequência mais altos significam maior contraste entre os *pixels* brancos e pretos, ou seja, há pouco acúmulo d'água. Isto ocorre devido à macrotextura do ponto ser muito aberta, e, assim a água escoava antes mesmo de ocorrer a saturação do revestimento.

Tabela 27 – Aplicação da FFT no CAUQ

| Etapas  | Frame 01  | Frame 40  |
|---|---|---|
| Imagem original   |  |  |
| Gráfico de distribuição de frequências versus quantidade de anéis |  |  |

Fonte: elaborada pela autora.

No CAUQ, observou-se que o primeiro *frame* tem um pico de distribuição bem abaixo do que no último *frame*, comportamento não característico, porém esperado. Como é possível visualizar a imagem do *Frame 01*, ocorreu a formação de lâmina d'água, o que ocasionou o fechamento da textura pela água. Com o escoamento, a textura ficou a mostra e assim, aumentou-se o contraste entre os *pixels*.

Após a plotagem dos gráficos de distribuição, calculou-se a área abaixo dos gráficos. Como observado na Tabela 28, o MRAF possui maior porcentagem de diferença entre as áreas do gráfico, ao contrário do CAUQ, que no *Frame 01* possui uma menor porcentagem, explicada pela formação da lâmina d'água no pavimento nesse momento.

Tabela 28 – Áreas dos gráficos de distribuição de frequência

| Revestimento/ponto | Área do gráfico/Frame 01 | Área do gráfico/Frame 40 | Percentual Drenado FF |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| MRAF/17            | 137.316,39               | 191.263,60               | 71,79%                |
| CAUQ/34            | 100.048,54               | 170.322,75               | 58,74%                |

Fonte: elaborada pela autora.

### 4.3 Comparativo entre os levantamentos convencionais e PDI

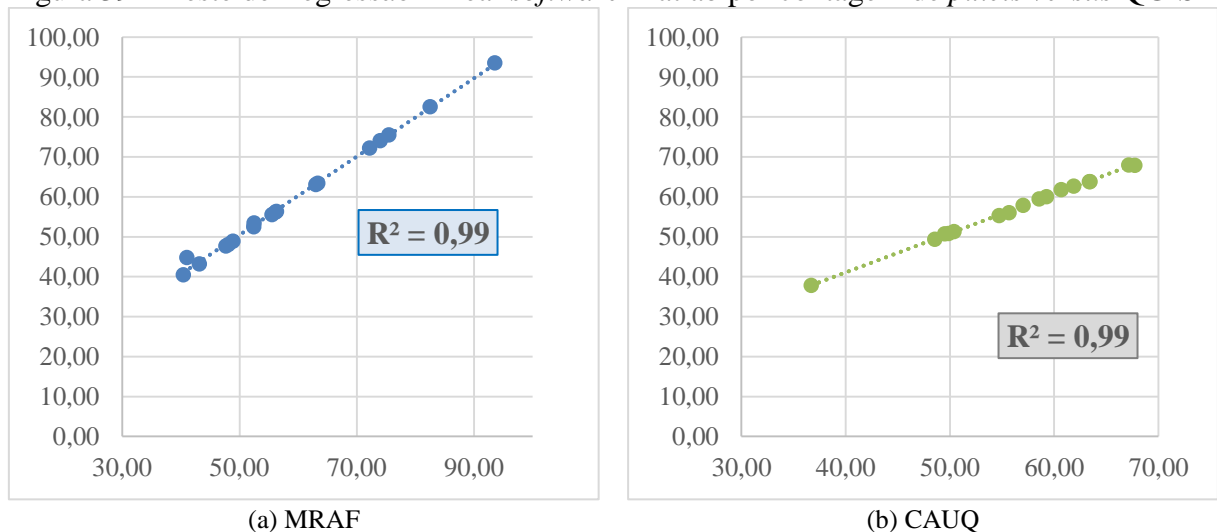
Para validação do método de contagem de *pixels* pelo *software* Matlab, compararam-se os resultados com o método de contagem de *pixels* pelo *software* QGIS e, assim, comprovar que o método é aplicável para ambos os *softwares*. Na Tabela 29 encontra-se o percentual drenado para cada ponto calculado pelos dois procedimentos, em que é possível observar a compatibilidade entre os resultados.

Tabela 29 – Comparativo % drenada Matlab *versus* % drenada QGIS

| MRAF   |                |                  | CAUQ   |                |                  |
|--------|----------------|------------------|--------|----------------|------------------|
| Pontos | % Drenada QGIS | % Drenada Matlab | Pontos | % Drenada QGIS | % Drenada Matlab |
| 1      | 72,23          | 72,23            | 20     | 58,56          | 59,47            |
| 2      | 47,72          | 47,72            | 21     | 50,39          | 51,31            |
| 3      | 52,52          | 53,47            | 22     | 67,16          | 67,96            |
| 4      | 74,03          | 74,03            | 23     | 49,87          | 50,77            |
| 5      | 56,17          | 56,17            | 24     | 48,56          | 49,34            |
| 6      | 52,46          | 52,46            | 27     | 60,68          | 61,75            |
| 7      | 63,06          | 63,06            | 28     | 67,75          | 67,91            |
| 8      | 55,56          | 55,56            | 31     | 49,51          | 50,70            |
| 9      | 48,12          | 48,12            | 32     | 36,71          | 37,81            |
| 10     | 56,31          | 56,31            | 33     | 63,44          | 63,78            |
| 11     | 41,05          | 44,76            | 34     | 55,67          | 56,00            |
| 12     | 43,18          | 43,18            | 35     | 54,73          | 55,31            |
| 13     | 63,39          | 63,39            | 37     | 61,89          | 62,69            |
| 14     | 40,43          | 40,43            | 38     | 63,38          | 63,79            |
| 15     | 48,88          | 48,88            | 39     | 57,03          | 57,86            |
| 16     | 75,48          | 75,48            | 40     | 59,25          | 60,04            |
| 17     | 78,73          | 78,73            |        |                |                  |
| 18     | 93,56          | 93,56            |        |                |                  |

Fonte: elaborada pela autora.

Para comprovar a conformidade entre os procedimentos calculou-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre os métodos para cada revestimento. Na Figura 39 valida-se a semelhança entre os procedimentos com  $R^2 = 0,99$  para os dois revestimentos. Cabe ressaltar que o *software* Matlab não possui livre acesso e necessita de uma base de conhecimento em programação de algoritmos, ao contrário do *software* QGIS que se encontra para *download* gratuitamente. Assim, as fortes correlações entre os métodos facilitariam a aplicação do método de avaliação da macrotextura em revestimentos com lâmina d'água por contagem de *pixels*.

Figura 39 – Teste de Regressão Linear *software* Matlab por contagem de *pixels* *versus* QGIS

Fonte: elaborada pela autora.

Comparativamente entre os métodos aplicados houve um significativo percentual de acerto da classificação da macrotextura em relação aos resultados obtidos em campo. Na primeira abordagem, em que se analisou o agrupamento dados por tipo de revestimento, o método de contagem de *pixels* pelo *software* Matlab conseguiu ótimas correlações com o mesmo método aplicado no *software* QGIS. O Método por Transformada de Fourier mesmo com menor taxa de acerto conseguiu resultados satisfatórios. A Tabela 30 apresenta o percentual de acerto da classificação de macrotextura em comparação aos resultados obtidos em campo e os resultados do modelo.

Tabela 30 – Percentual de acerto da classificação da macrotextura campo *versus* modelo por tipo de revestimento

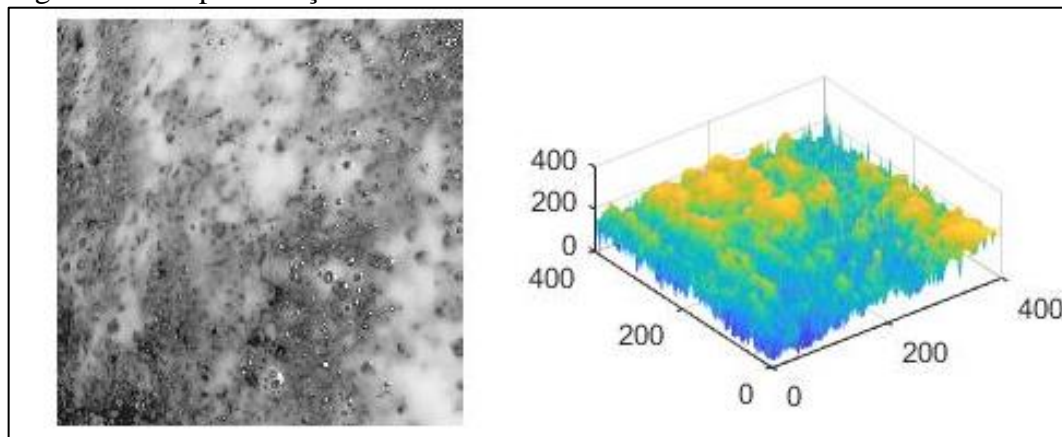
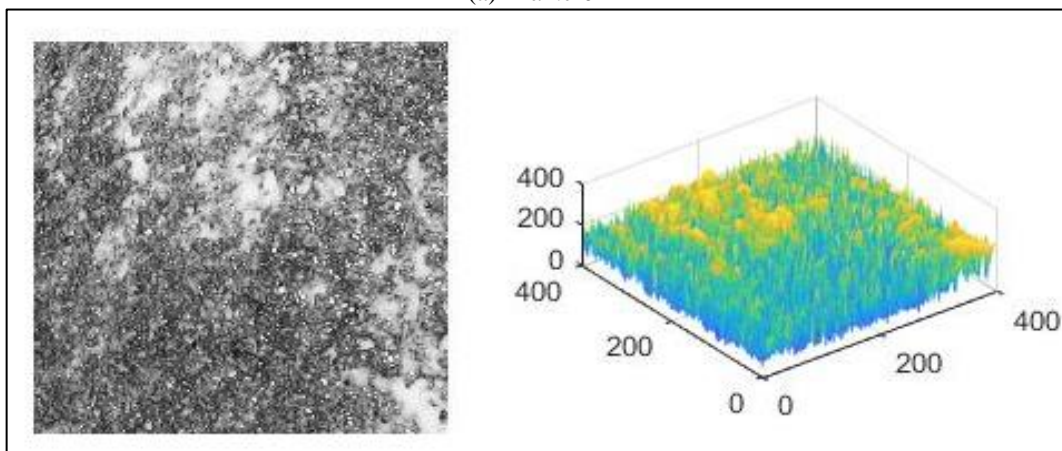
| <b>Revestimento</b> | <b>Matlab</b> | <b>QGIS</b> | <b>FFT</b> |
|---------------------|---------------|-------------|------------|
| MRAF                | 77%           | 77%         | 64%        |
| CAUQ                | 76%           | 76%         | 75%        |

Fonte: elaborada pela autora.

Para a segunda abordagem que analisa a classificação da macrotextura obtida pelo ensaio de mancha de areia, todos os métodos obtiveram 100% de acerto da classificação da macrotextura. Todavia, suas fracas correlações com baixos coeficientes de determinação podem ser que esse método não represente a realidade, pois os mesmos valores de Hm não correspondem a mesma porcentagem drenada nos dois tipos de revestimentos analisados.

Representativamente, escolheram-se dois pontos para comparação, o ponto 17 para o MRAF e o ponto 34 para o CAUQ. O MRAF possui uma macrotextura classificada como Muito Aberta. Nos métodos de PDI confirmaram-se os resultados apresentados pelo levantamento tradicional, em que esse tipo de revestimento escoar a água em maior velocidade produzindo um percentual de drenagem menor, devido ao impedimento a formação da lâmina d'água. Na avaliação por Transformada de Fourier, verificou-se que a diferença entre as áreas dos gráficos de distribuição de frequência é menor, devido à água não conseguir preencher completamente a textura no momento inicial, havendo uma menor diferença entre o início da saturação e o final do escoamento e conseqüentemente, um maior percentual drenado. A Figura 40 demonstra, em representação 3D, o acúmulo de líquido nos dois momentos analisados, podendo, assim, visualizar a diminuição do líquido representado pela cor amarela para o MRAF.

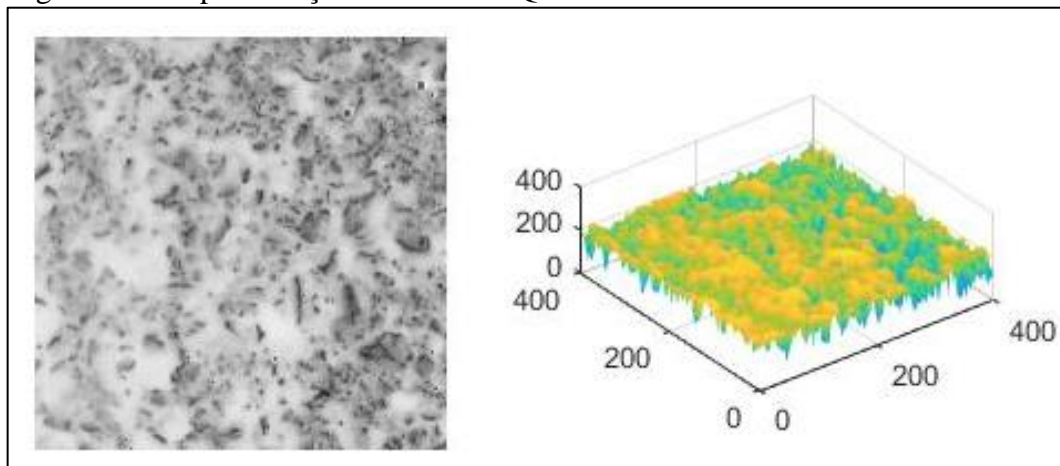
Figura 40 – Representação 3D do MRAF

(a) *Frame 01*(b) *Frame 40*

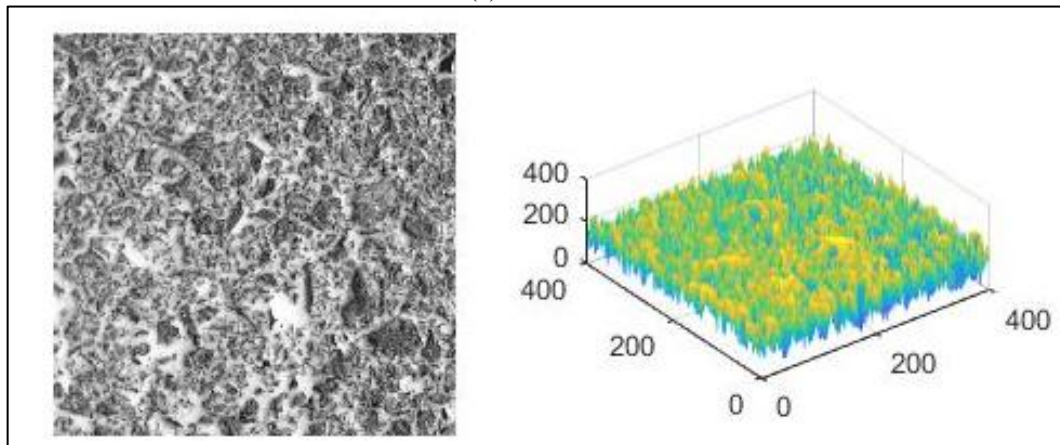
Fonte: elaborada pela autora.

O CAUQ foi classificado como macrotextura média na PPD do Aeródromo do Catuleve, conseqüentemente sua capacidade de drenagem é menor. No processamento das imagens é possível visualizar o mesmo comportamento do método convencional. O percentual drenado de água nesse revestimento é menos considerável do que no MRAF, já que é propício a formação de lâmina d'água. Nas análises por FFT, o comportamento é o mesmo, ou seja, a lâmina d'água presente no revestimento no momento inicial permite que a diferença entre o início da saturação e o final fosse maior, mantendo o percentual de drenagem muito próximo aos outros métodos. A Figura 41 demonstra em representação 3D o acúmulo de líquido nos dois momentos analisados, podendo, assim, visualizar a diminuição do líquido representado pela cor amarela para o CAUQ. Na Tabela 33 é possível visualizar o comportamento dos métodos de processamento de imagens de acordo com o ensaio convencional.

Figura 41 – Representação 3D do CAUQ



(a) Frame 01



(b) Frame 40

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 31 – Comparativo entre os métodos na representação de dois pontos

| Revestimento/ponto | Hm (mm) | Percentual drenado | Percentual drenado | Percentual Drenado |
|--------------------|---------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                    |         | Matlab             | QGIS               | FFT                |
| MRAF/17            | 1,55    | 78,73              | 78,73              | 71,79              |
| CAUQ/34            | 0,75    | 56,00              | 55,67              | 58,54              |

Fonte: elaborada pela autora.

Comparativamente entre os métodos, é possível observar na Tabela 31, a proximidade entre os valores de percentual drenado dos métodos para os dois pontos representativos analisados. Além disso, o percentual drenado é condizente com o valor de profundidade de macrotextura obtido pelo ensaio de mancha de areia.

## 5 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho, que contemplam a avaliação da macrotextura da pista de pouso e decolagem (PPD) do Aeródromo do Catuleve por meio do ensaio de Mancha de Areia e pelo os métodos de Processamento Digital de Imagens. E ainda se avaliou o método mais satisfatório de análise de imagens para a situação de revestimento com lâmina d'água. Além disso, serão sugeridas recomendações para trabalhos futuros.

### 5.1 Principais conclusões

A aplicação do processamento digital de imagens como ferramenta para avaliação da PPD do Aeródromo do Catuleve tem mostrado resultados satisfatórios. A fim de promover o avanço no conhecimento da técnica de avaliação da textura de revestimentos aeroportuários, aplicaram-se três métodos de PDI para análise da capacidade drenante de um revestimento tipo Microrrevestimento Asfáltico a Frio (MRAF) e Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ).

A análise comparativa entre os resultados do PDI e os valores de profundidade de macrotextura mostrou uma fraca correlação entre os resultados. No método do *software* Matlab R2017a por contagem de *pixels*, para o revestimento de MRAF o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi de 0,52, e para o CAUQ obteve  $R^2$  de 0,08. No Método de Transformada de Fourier, os coeficientes de determinação foram de 0,09 e 0,08 para o MRAF e CAUQ, respectivamente. Os resultados do *software* QGIS 2.18 *with grass* foram utilizados como validação do *software* Matlab por contagem de *pixels*.

Mesmo com fracas correlações investigou-se a possibilidade de as equações geradas pelos gráficos de correlação conseguirem estimar a classificação da macrotextura. As equações não conseguiram estimar precisamente os valores de macrotextura igual ao obtido pelo ensaio de Mancha de Areia. Todavia, quando se trata de classificação, os modelos conseguem estimar sua classificação de profundidade de macrotextura na maioria dos casos.

Foi possível observar adequados percentuais de acerto da classificação da macrotextura por meio do PDI. Na primeira abordagem de análise, com dados agrupados pelo tipo de revestimento, o método desenvolvido no *software* Matlab R2017a que classificou a macrotextura por contagem de *pixels* brancos se atestou o mais eficiente dos métodos. Para o revestimento de MRAF o modelo obteve a mesma classificação em 77% dos pontos. Por sua

vez, para o CAUQ, o percentual de acerto da classificação da macrotextura pelo modelo foi 76% dos pontos. Todavia esse *software* não se encontra disponível gratuitamente, o que seria uma limitação da aplicação do método. Essa limitação foi solucionada com a aplicação do método de contagem de *pixels* no *software* QGIS 2.18 *with grass*, o qual possui livre acesso e fácil manuseio. Os resultados comprovaram uma forte correlação entre os dois *softwares* com coeficiente de determinação de 0,99.

O Método de Transformada de Fourier também obteve adequados resultados quanto à predição da classificação da macrotextura. Ao contrário do método por contagem de *pixels*, o modelo do FFT foi mais bem aplicado para o CAUQ com 75% de acerto na classificação da macrotextura, para o MRAF, sua taxa de sucesso foi de 64%.

Na segunda abordagem de análise, os métodos obtiveram 100% de sucesso na classificação da macrotextura. Contudo, essa análise pode não representar a realidade, pois o método obteve fracas correlações com os valores de macrotextura obtidos pelo ensaio de mancha de areia.

Para o método mais satisfatório de PDI, ou seja, o método de contagem de *pixels*, os resultados de porcentagem drenada foram condizentes com sua classificação de macrotextura. No MRAF, com a classificação de macrotextura aberta encontrou-se valores maiores de porcentagem drenada (59,51%) em comparação ao CAUQ que possui a classificação de macrotextura média e menor valor de porcentagem drenada (57,28%). Conclui-se, então, que o método consegue ser medianamente condizente com a realidade.

A maioria dos métodos que avaliam as características da textura do pavimento baseia-se na situação seca da superfície do pavimento. O presente trabalho contribui, portanto, para o estado da arte da avaliação da drenagem superficial do pavimento, principalmente para aeródromos de pequeno porte. A restauração do pavimento de CAUQ com MRAF mostra-se eficiente para recuperar as características de macrotextura do revestimento, conseqüentemente de drenagem superficial.

Conclui-se que o método é promissor para a análise a interferência da macrotextura na drenagem superficial de PPD's. A proposta de método encontra-se no Apêndice E. Porém é necessário aprimorar os modelos em outras PPD's, que tenham uma avaliação constante das condições de macrotextura. Desse modo, verifica-se que é satisfatório os resultados dos métodos de avaliação da macrotextura em condições de saturação do revestimento por meio de PDI, contribuindo, assim, com o desenvolvimento dos procedimentos de avaliação da segurança operacional em aeródromos.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Serão listadas, a seguir, algumas sugestões para o desenvolvimento de futuras pesquisas que poderão dar continuidade a este trabalho:

- a) Aplicar os métodos em outros tipos de revestimentos de pistas de pouso e decolagem e classificação de macrotextura, a fim de investigar sua aplicabilidade em uma maior gama de revestimentos;
- b) Desenvolver uma classificação para a porcentagem drenada de diferentes tipos de revestimentos;
- c) Aplicar metodologias de análise da drenagem superficial e macrotextura em 3D, a fim de investigar a altura de lâmina d'água formada nos revestimentos.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (Brasil). **Anuário do Transporte Aéreo 2019**. Brasília: ANAC, 2020a. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/anuario/2019.zip>. Acesso em: 15 jul. 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (Brasil). **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil – RBAC nº 153**: Emenda nº 05: aeródromos – operação, manutenção e resposta à emergência: Brasília: ANAC, 17 set. 2020b. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-153>. Acesso em: 15 jul. 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (Brasil). Resolução nº 236, de 5 de junho de 2012. Estabelece requisitos de aderência para pistas de pouso e decolagem. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 149, n. 111, p. 6-8, 11 jun. 2012. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=11/06/2012&jornal=1&pagina=6>. Acesso em: 15 jul. 2020.
- AHAMMED, M. A. **Safe, quiet and durable pavement surfaces**. 2009. 277 p. Thesis (Doctoral of Philosophy in Civil Engineering) – University of Waterloo, Ontario, CA, 2009. Disponível em: <https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/4290>. Acesso em: 16 ago. 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E867-97**: terminology relating to vehicle-pavement systems. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012.
- APS, M. **Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI – Internacional Friction Index para revestimentos asfálticos**. 2006. 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-11122006-144825/pt-br.php>. Acesso em: 16 ago. 2020.
- ARAÚJO, V. M. C. **Avaliação da textura de misturas asfálticas para uso em revestimentos aeroportuários a partir do uso do processamento digital de imagens**. 2017. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/28428>. Acesso em: 16 ago. 2020.
- ARAÚJO, V. M. C.; BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F. Measuring skid resistance of hot mix asphalt using the aggregate image measurement system (AIMS). **Construction and Building Materials**, New York, v. 98, p. 476-481, Nov. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.117>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815303342>. Acesso em: 7 out. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16504**: misturas asfálticas – determinação da profundidade média da macrotextura superficial de pavimentos asfálticos por volumetria – método da mancha de areia. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- FERREIRA, P. N. **Avaliação da macrotextura de trechos pavimentados de rodovias estaduais situadas na região insular do município de Florianópolis**. 2002. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/83763>. Acesso em: 16 ago. 2020.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de imagens digitais**. Tradução de Roberto Marcondes Cesar Junior e Luciano de Fontoura Costa. São Paulo: Blucher, 2000.

GOOGLE. **Google Earth website**. [Mountain View, CA]: Google, 2020. Disponível em: <https://earth.google.com/web/>. Acesso em: 12 ago. 2020.

HICHRI, Y. *et al.* Effect of particles' characteristics and road surface's texture on the tire/road friction. **Surface Topography: Metrology and Properties**, London, v. 6, n. 3, 034014, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/2051-672X/aad063>. Disponível em: <https://core.ac.uk/reader/195561340>. Acesso em: 7 out. 2020.

JAYAWICKRAMA, P. W.; PRASANNA, R.; SENADHEERA, S. P. Survey of state practices to control skid resistance on hot-mix asphalt concrete pavements. **Transportation Research Record**, Washington, DC, v. 1536, n. 1, p. 52-58, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198196153600108>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0361198196153600108>. Acesso em: 7 out. 2020.

MATAEI, B. *et al.* Evaluation of pavement surface drainage using an automated image acquisition and processing system. **Automation in Construction**, Amsterdam, v. 86, p. 240-255, Feb. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.11.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580516304319>. Acesso em: 7 out. 2020.

NOYCE, D. A. *et al.* **Incorporating road safety into pavement management**: maximizing asphalt pavement surface friction for road safety improvements. Madison, WI: Transportation Center Midwest Regional University: Traffic Operations and Safety (TOPS), Laboratory, 29 Apr. 2005. DRAFT Literature Review & State Surveys. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.130.4067&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 9 out. 2020.

OLIVEIRA, F. H. L. **Proposição de estratégias de manutenção de pavimentos aeroportuários baseadas na macrotextura e no atrito**: estudo de caso do Aeroporto Internacional de Fortaleza. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/4866>. Acesso em: 16 ago. 2020.

OLIVEIRA, F. H. L.; ARANTES, A. E.; FONTENELE, P. S. Análise da macrotextura de camada porosa de atrito em serviço por processamento digital de imagens. *In*: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 33., 2019, Balneário Camboriú. **Anais [...]**. Balneário Camboriú: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2019. p. 1363-1372. Disponível em: [http://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Infraestrutura/Dimensionamento,%20Avaliação%20e%20Gestão%20de%20Pavimentos%20IV/5\\_285\\_AC.pdf](http://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Infraestrutura/Dimensionamento,%20Avaliação%20e%20Gestão%20de%20Pavimentos%20IV/5_285_AC.pdf). Acesso em: 12 set. 2020.

ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. **Manual de servicios de aeropuertos**: Parte 2 – Estado de la superficie de los pavimentos. 4. ed. Lima, Peru: OACI, 2002. Disponível em: [https://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/C0126/descargar.php?secc=0&id=C0126&id\\_inc=22629](https://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/C0126/descargar.php?secc=0&id=C0126&id_inc=22629). Acesso em: 12 set. 2020.

OTSU, N. A. Threshold selection method from gray-level histograms. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, New York, v. 9, n. 1, p. 62-66, Jan. 1979. DOI:

<https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4310076>. Acesso em: 7 out. 2020.

PIDWERBESKY, B. *et al.* **Road surface texture measurement using digital image processing and information theory**. Wellington, NZ: Land Transport New Zealand, 2006. (Land Transport New Zealand Research Report, 290). Disponível em: <https://www.nzta.govt.nz/resources/research/reports/290/>. Acesso em: 7 out. 2020.

PULUGURTHA, S. S.; KUSAM, P. R.; PATEL, K. **Relationship between pavement macrotexture and crash incidences on North Carolina roads**. Raleigh, NC: North Carolina Department of Transportation, 27 Feb. 2007. Final Report FHWA/NC/2007-12. Disponível em: <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/5694>. Acesso em: 7 out. 2020.

PUZZO, L. *et al.* Three-dimensional survey method of pavement texture using photographic equipment. **Measurement**, Amsterdam, v. 111, p. 146-157, Dec. 2017. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.040>. Disponível em: <https://www.science-direct.com/science/article/abs/pii/S0263224117304694>. Acesso em: 9 out. 2020.

RODRIGUES, A. C. **Avaliação da influência da granulometria na aderência pneu-pavimento**. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/11176>. Acesso em: 16 ago. 2020.

RODRIGUES FILHO, O. S. **Características de aderência de revestimentos asfálticos aeroportuários: estudo de caso do Aeroporto Internacional de São Paulo/Congonhas**. 2006. 263 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-01122006-142419/pt-br.php>. Acesso em: 16 ago. 2020.

SANTOS, L. C. B. *et al.* **Aeródromos: Sumário Estatístico 2008-2017**. Brasília: Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA), 2018. Disponível em: <https://www2.fab.mil.br/cenipa/index.php/anexos/category/1-downloads?download=156:sumario-estatistico-aerodromos>. Acesso em: 9 out. 2020.

SANTOS, R. T. **Análise da macrotextura de pavimentos através de processamento de imagens usando Transformada de Fourier**. 2008. 99 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2008. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp055561.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2020.

SCHMIEDEL, B.; GAUTERIN, F.; UNRAU, H.-J. Road wetness quantification via tyre spray. **Journal of Automobile Engineering**, London, v. 233, n. 1, p. 28-37, Jan. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407018778972>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0954407018778972>. Acesso em: 9 out. 2020.

SILVA, J. P. S. **Aderência pneu-pavimento em revestimentos asfálticos aeroportuários**. 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/3470>. Acesso em: 16 ago. 2020.

SOCIÉTÉ DE TECHNOLOGIE MICHELIN. **Le pneu: L'adhérence**. Clermont-Ferrand: Société de Technologie Michelin, 2001. Disponível em: <https://ur.b-ok.global/dl/3676311/c6a42c>. Acesso em: 9 out. 2020.

SOUSA, E. S. **Verificação do parâmetro de macrotextura de pavimentos em serviço por meio de Processamento Digital de Imagens**. 2018. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/ri/handle/riufc/40414>. Acesso em: 16 ago. 2020.

## APÊNDICE A – ALGORITMO DE EXTRAÇÃO DE *FRAMES*

```
[fileName, filePath] = uigetfile({'*.mp4; *.avi', "Formatos de videos suportados"}, 'Selecione um video para remoção de frames');
```

```
caminhoDoVideo = fullfile(filePath, fileName);
```

```
pastaFrames = 'frames';
```

```
rmdir(pastaFrames, 's');
```

```
mkdir(pastaFrames);
```

```
system(['ffmpeg -i "' caminhoDoVideo "' -vf "fps=1/1,crop=400:400" -qscale:v 1 ' pastaFrames '/frame%04d.tiff -hide_banner']);
```

**APÊNDICE B – MÉTODO DE OTSU**

```
IM=imread('frames/frame0001.jpg');  
level= graythresh(IM);  
BW=im2bw(IM,level);  
  
subplot(1,2,1);  
imshow(IM);  
title('imagem original')  
subplot(1,2,2);  
imshow(BW);  
title(['imagem binarizada ' num2str(level)])
```

## APÊNDICE C – MÉTODO POR CONTAGEM DE *PIXELS*

```

function area=calculo_area(frame)
I=imread(frame); %leitura da imagem
subplot(2,3,1);imshow(I);
title('Imagem Original');

EC=rgb2gray(I); %transformar para cinza/filtro
subplot(2,3,2);imshow(EC);
title('Imagem Monocromática');
subplot(2,3,3);imhist(EC);
title('Histograma');
limiar= x;

A= imbinarize(EC,limiar); %binarizar a imagem/filtro
subplot(2,3,4);imshow(A);
title('Imagem binarizada ')
area=sum(A (:)); %calculo da quantidade de pixels brancos somando cada pixel
end

figure(1);area1 = calculo_area('frames/frame0001.tiff'); %calcular a area da primeira frame
figure;area3 = calculo_area('frames/frame0040.tiff'); %calcular a area da última frame

disp(['Area 1: ',num2str(area1)]);
disp(['Area 3: ',num2str(area3)]);

percentual_drenado =area3/area1;
disp(['percentual_drenado: ',num2str(percentual_drenado)]);

```

## APÊNDICE D – MÉTODO POR TRANSFORMADA DE FOURIER

```

function area=area_grafico(frame)
I = imread(frame);
EC = rgb2gray(I);
largimg = size (EC,1);
larganel = 2;
quantaneis = floor(largimg / (2 * larganel)- 1);
D = larganel;%distancia dos quadrados
figure,imshow(EC); %mostra a img com tons cinza
fftsum = zeros(1, quantaneis); %variavel para armazenar o soma do fft para cada anel
fftim = fft2(im2double(EC));%calcula o fft 2D da imagem
i=1; %indice
tempold =0;%variavel temporaria para armazenar a soma antiga
%o tamanho da imagem e 400x400
while D < (largimg/2 -1) % metade 400/2 -1
xmin = (largimg/2) - D; %400/2
ymin = (largimg/2) - D;
xmax = (largimg/2) + D;
ymax = (largimg/2) + D;
temp = fftim(xmin:xmax,ymin:ymax); %retira o quadrado da imagem
imshow(temp);
if i == 1
fftsum(i) = sum(temp(:)); %soma cada pixel do quadrado retirado
tempold = sum(temp(:)); % guarda o valor da soma para usar na proxima iteracao
else
fftsum(i) = sum(temp(:)) - tempold; % diminuisoma do quadrado atual do anterior
tempold = sum(temp(:)); % guarda o valor para a proxima iteracao
end
i = i+1; %incrementa i
D = D + larganel; % incrementa o valor para o proximo quadrado
end
figure, plot(abs(fftsum(end:-1:1))); % plota o grafico
xlabel('N° de anéis')

```

```
ylabel('Distribuição de frequências')  
area=trapz(abs(fftsum));  
end
```

```
clear all, clc
```

```
area1 = area_grafico('frames/frame0001.tiff'); %calcula a area abaixo do gráfico do primeiro  
frame
```

```
area40 = area_grafico('frames/frame0040.tiff'); %calcula a area abaixo do gráfico do último  
frame
```

```
disp(['Area 1: ',num2str(area1)]);
```

```
disp(['Area 40: ',num2str(area40)]);
```

## APÊNDICE E – PROPOSTA DE MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DA DRENAGEM SUPERFICIAL EM PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM DE AERÓDROMOS DE PEQUENO PORTE

### MATERIAIS

- Câmera digital com alta resolução;
- Tripé de 20 cm;
- Recipiente para despejo do líquido;
- Água;
- 10 ml de tinta branca lavável para cada litro de água.

### MÉTODO DE ENSAIO

1. Misturar a água com a tinta branca;
2. Posicionar a câmera a 20 cm do revestimento;
3. Gravar o despejo do líquido;
4. Despejar o líquido durante 40 segundos.

### MÉTODO DE PDI

1. Extrair os *frames* dos vídeos;
2. Processar as imagens no algoritmo no *software* Matlab, que calcula a quantidade de *pixels* brancos na imagem;
3. Exportar os valores de quantidade de pixels brancos de cada imagem para o Excel;
4. Calcular a porcentagem de pixels brancos que diminuiram com o tempo de escoamento.